

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 03.03.02 «Физика»

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Исследование термической стабильности образцов титанового сплава ВТ6, полученных методом аддитивных технологий

УДК 669.295.5:004.925.84

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б41	Буйлук Артем Олегович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Панин А.В.	д.ф.-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально- гуманитарных наук	Меньшикова Е.В.	к.ф.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. ЭБЖ ИНК ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ	Лидер А.М.	д.т.н.		

Томск – 2018 г.

## Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник способен)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные компетенции</i>		
<b>Р1</b>	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности	Требования ФГОСЗ+ (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4)
<b>Р2</b>	К самоорганизации и самообразованию, работать в коллективе, к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.	Требования ФГОСЗ+ (ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9)
<i>Общепрофессиональные компетенции</i>		
<b>Р3</b>	Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка.	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-7)
<b>Р4</b>	Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6)
<b>Р5</b>	Получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности.	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-8, ОПК-9)
<i>Профессиональные компетенции</i>		
<b>Р6</b>	<u>Научно-исследовательская деятельность</u> Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, физики плазмы с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.	Требования ФГОСЗ+ (ПК-1, ПК-2)

<b>P7</b>	<u>Научно-инновационная деятельность</u> Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения в результате освоения профильных дисциплин для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.	Требования ФГОСЗ+ (ПК-3, ПК-4, ПК-5)
<b>P8</b>	<u>Организационно-управленческая</u> Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования	Требования ФГОСЗ+ (ПК-6, ПК-7, ПК-8)
<b>P9</b>	<u>Педагогически-просветительская</u> Проектировать, организовывать, анализировать педагогическую деятельность, владеть последовательностью изложения материала с использованием междисциплинарных связей физики с другими дисциплинами, участвовать в информационно-образовательных мероприятиях по пропаганде и распространению научных знаний	Требования ФГОСЗ+ (ПК-9)

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа базовой инженерной подготовки  
Направление подготовки 03.03.02 «Физика»  
Отделение школы (НОЦ) экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
\_\_\_\_\_ Лидер А.М.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

<b>бакалаврской работы</b>
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОБ41	Буйлук Артем Олегович

Тема работы:

Исследование термической стабильности образцов титанового сплава ВТ6, полученных методом аддитивных технологий	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	31.01.2018, №533/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Образцы титанового сплава ВТ6, полученные методом электронно-лучевого плавления порошка и проволоки</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Обзор литературных источников;</li> <li>– Исследование микроструктуры, фазового состава и механических свойств образцов, полученных плавлением порошка и проволоки титанового сплава ВТ6;</li> <li>– Анализ полученных результатов;</li> <li>– Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> <li>– Социальная ответственность;</li> <li>– Заключение.</li> </ul>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Микроструктура образцов титанового сплава ВТ6, полученных методами прокатки и электронно-лучевым плавлением;</li> <li>– Рентгенограммы образцов титанового сплава ВТ6, полученных методами прокатки и электронно-лучевым плавлением.</li> </ul>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Социальная ответственность</p>	
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском:</b></p>	
<p>литературный обзор; материалы и методика эксперимента; экспериментальная часть; финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; социальная ответственность; заключение</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Панин А.В.	д.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБ41	Буйлук Артем Олегович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОБ41	Буйлук Артем Олегович

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	03.03.02 Физика

**Тема дипломной работы: Исследование термической стабильности образцов титанового сплава ВТ6, полученных методом аддитивных технологий**

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Заработная плата – 100184 руб.;</li> <li>– Амортизационные отчисления – 149472,1 руб.;</li> <li>– Отчисления во внебюджетные фонды – 27149,9 руб.;</li> <li>– Бюджет затрат – 325656 руб.</li> </ul>
2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 27,1 %.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Иерархическая структура работ
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	SWOT-анализ

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>- Матрица SWOT</li> <li>- График проведения и бюджет НИ</li> <li>- Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</li> </ul>
--

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Меньшикова Екатерина Валентиновна	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБ41	Буйлук Артем Олегович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0Б41	Буйлук Артем Олегович

<b>Школа</b>	<b>ИШЯТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЭФ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	03.03.02 Физика

**Тема дипломной работы: Исследование термической стабильности образцов титанового сплава ВТ6, полученных методом аддитивных технологий**

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><i>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</li> <li>– чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</li> </ul>	<p>При выполнении работ по сравнительному анализу образцов из титанового сплава ВТ6, полученные методом аддитивных технологий, на исполнителей возможны вредные проявления следующих факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Освещение;</li> <li>– Шум;</li> <li>– Микроклимат;</li> <li>– Психофизические факторы.</li> </ul> <p>Возможно возникновение ЧС техногенного и экологического характера</p>
<p><i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<p>По данной теме рассматриваются следующие документы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ;</li> <li>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы;</li> <li>– ГОСТ Р 50948-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности;</li> <li>– ГОСТ Р 50949-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности;</li> <li>– ГОСТ Р 50923-96. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные помещения. Параметры микроклимата в помещении;</li> <li>– ГОСТ 12.1.005 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны;</li> <li>– СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений</li> </ul>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем –индивидуальные защитные средства)</li> </ul>	<p>1. Характеристика факторов изучаемой рабочей среды, описывающих процесс взаимодействия человека с окружающей производственной средой:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– воздействие микроклиматических условий на организм человека;</li> <li>– психофизические факторы;</li> <li>– расчет освещения рабочего места.</li> </ul>
<p><i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</li> </ul>	<p>2. Анализ опасных факторов проектируемой производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (непосредственное питание аппаратуры; средства защиты, предусмотренные конструкцией, соблюдение правил и инструкций по электробезопасности при работе);</li> <li>– пожарная безопасность (соблюдение правил безопасности и профилактические инструктирующие мероприятия).</li> </ul>
<p><i>3. Охрана окружающей среды:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу</li> </ul>	<p>3. Факторы рабочего места, влияющие на окружающую среду:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– утилизация люминесцентных ламп;</li> <li>– переработка бытового мусора.</li> </ul>



<p>(отходы);</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС на объекте;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</li> </ul>	<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий;</li> <li>– сильные морозы;</li> <li>– проникновение посторонних на рабочее место.</li> </ul>
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</li> </ul>	<p>5. Правовые вопросы обеспечения безопасности</p>
<b>Перечень графического материала:</b>	
<p>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчетному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</p>	<p>1. План эвакуации;</p> <p>2. План размещения светильников на потолке рабочего места.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	26.02.2018
--	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. ЭБЖ ИНК ТПУ	Федорчук Юрий Митрофанович	д.т.н.		26.02.2018

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б41	Буйлук Артем Олегович		26.02.2018

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Уровень образования бакалавриат

Направление подготовки 03.03.02 «Физика»

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

Период выполнения \_\_\_\_\_

Форма представления работы:

бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы: \_\_\_\_\_

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
09.01.2018	Аналитический обзор литературы	15
28.02.2018	Исследования микроструктуры, фазового состава и механических свойств образцов титанового сплава ВТ6, полученных методом электронно-лучевого плавления	15
25.04.2018	Исследования микроструктуры, фазового состава и механических свойств образцов сплава ВТ6, полученных методом электронно-лучевого плавления, отожженных в вакууме при 900°С в течение часа	20
3.05.2018	Анализ результатов	15
25.05.2018	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
25.05.2018	Социальная ответственность	15
25.05.2018	Заключение	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Панин А.В.	д.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ	Лидер А.М.	д.т.н.		

## Оглавление

Введение.....	15
Глава 1. Литературный обзор .....	17
1.1 Классификация аддитивных технологий.....	17
1.2 Методы 3D-печати изделий из титановых сплавов .....	20
1.1.1 Селективное лазерное плавление (СЛП, англ. SLM).....	20
1.1.2 Электронно-лучевое плавление (ЭЛП, англ. EBM) .....	21
1.3 Термическая обработка изделий изготовленных методом аддитивных технологий из порошка и проволоки титановых сплавов .....	27
Глава 2. Материалы и методика эксперимента.....	31
2.1 Технологические параметры 3D-печати .....	31
2.2 Методы подготовки и исследования 3D-напечатанных образцов.....	33
Глава 3. Экспериментальная часть .....	34
3.1 Исследование микроструктуры и механических свойств образцов из титанового сплава ВТ6 .....	34
3.2 Влияние термической обработки на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства 3D-напечатанных образцов методом ЭЛП.....	39
Заключение.....	43
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	45
Введение.....	45
4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	46
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования .....	46
4.1.2. Анализ конкурентных технических решений .....	47
4.1.3. SWOT-анализ.....	48
4.2. Планирование научно-исследовательских работ .....	50
4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования .....	50
4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ .....	51
4.2.3. Разработка графика проведения научного исследования.....	52
4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	55

4.3.1. Расчет материальных затрат НТИ .....	55
4.3.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.....	56
4.3.3. Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы	57
4.3.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	60
4.3.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .....	61
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования..	61
4.4.1. Определение ресурсной эффективности исследования.....	61
Глава 5. Социальная ответственность .....	64
Введение.....	64
5.1 Техногенная безопасность.....	65
5.2 Анализ вредных факторов на рабочем месте .....	66
5.2.1 Освещенность .....	66
5.2.2 Шум .....	71
5.2.3 Микроклимат .....	74
5.2.4 Психофизические факторы.....	75
5.3 Анализ опасных факторов на рабочем месте .....	76
5.3.1 Электробезопасность .....	76
5.3.2 Пожарная безопасность .....	78
5.4 Чрезвычайные ситуации.....	80
5.4.1 Защита в чрезвычайных ситуациях.....	81
5.5 Охрана окружающей среды .....	82
5.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	83
Список использованной литературы .....	85

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 88 с., 21 рис., 22 табл., 25 источников.

Ключевые слова: титановый сплав, аддитивные технологии, электронно-лучевое плавление, термическая стабильность.

Объектом исследования является титановый сплав ВТ6, полученный методом электронно-лучевого плавления.

Цель работы – проведение сравнительного анализа микроструктуры, фазового состава и механических свойств образцов титанового сплава ВТ6, полученных методами прокатки и электронно-лучевым плавлением порошка и проволоки, а также исследование их термической стабильности.

В данной работе проводился сравнительный анализ образцов титанового сплава ВТ6, полученных методами прокатки и электронно-лучевым плавлением порошка и проволоки. В процессе работы проводились исследования микроструктуры, фазового состава и механических свойств образцов, а также исследование их термической стабильности.

В результате исследования установлено, что микротвердость 3D-напечатанного образца, полученного методом плавления порошка превышает значение микротвердости образца полученного методом прокатки в 1,3 раза. Образец полученный методом электронно-лучевого плавления проволоки, обладает наибольшей термической стабильностью по сравнению с образцом полученным этим же методом, но расходный материал подавался в виде порошка.

Область применения: аэрокосмическая — производство элементов газовых турбин, двигателей и корпусов летательных аппаратов; медицина — изготовление протезов и имплантов; мелкосерийное производство — изготовление пресс-форм, вставок, заготовок.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке и создании изделий, превышающих механические свойства изделий, полученных традиционными методами.

## **Введение**

Современные темпы развития промышленности требуют выбора технологий производства, требующих наименьших затрат и выполняемых в кратчайшие сроки. Наряду с новыми и передовыми технологиями можно отметить быстрое развитие аддитивных технологий, позволяющих создавать металлические изделия уникальной формы [1]. Они позволяют пересмотреть весь процесс технологического производства из широкого класса материалов, таких как, металлы, композиционные материалы, неметаллы керамики и т.д. Они позволяют подойти к новым методам конструирования, проектирования производственных процессов.

Существует огромное количество определений, так или иначе характеризующие аддитивные технологии. Аддитивными технологиями называют технологии, изготовление изделий по данным цифровой модели, методом послойного добавления расходного материала [2].

В данной работе материалом для исследования был титановый сплав ВТ6, полученный методом прокатки и электронно-лучевым плавлением. Титановые сплавы являются одним из основных конструкционных материалов, применяемых в настоящее время в разных отраслях промышленности [3-4]. ВТ6 является одним из главнейших титановых сплавов используемых в промышленности. Примерно 90% всех сплавов приходится на сплав данного состава. Широко используется в аэрокосмической и медицинской областях. Именно эти сферы наиболее привлекательны с точки зрения применения аддитивных технологий, так как используют небольшие по объемам производства, количество изделий широкой номенклатурой [5]. Все это позволяет использовать эти новые технологии с наибольшим выигрышем с точки зрения экономики.

Для нас было крайне важно установить, отличаются ли структурные и механические свойства материалов из титанового сплава ВТ6, изготовленные методами аддитивных технологий, а именно электронно-лучевым

плавлением, от материалов полученных традиционными методами, а именно прокатки.

Целью работы являлось проведение сравнительного анализа микроструктуры, фазового состава и механических свойств образцов титанового сплава ВТ6, полученных методами прокатки, электронно-лучевым плавлением порошка и проволоки, а также исследование их термической стабильности.

Для достижения данной цели в работе были поставлены следующие задачи:

Микроструктурные исследования 3D-напечатанных образцов с помощью оптического микроскопа;

Рентгеноструктурный анализ образцов;

Измерение микротвердости образцов на твердомере по методу Виккерса;

Исследование микроструктуры и механических свойств образцов, после отжига при 900°С в вакууме в течение 1 часа.



## **Глава 1. Литературный обзор**

### **1.1 Классификация аддитивных технологий**

Высокая стоимость производства изделий из титановых сплавов, главным образом связанная с их механической обработкой. Привела к исследованию и разработке различных технологий, для изготовления деталей, которые позволяли бы получать изделия максимально приближенные по форме и свойствам к конечной детали [6]. К одному из таких способов относятся аддитивные технологии (АТ).

Аддитивные технологии позволяют создавать изделия уникальной формы с внутренней полой структурой. Интерес к аддитивным технологиям, в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для производства металлических изделий возник в авиационной промышленности, космической и энергетическом машиностроении [1-2]. Мотивацией для введения аддитивных технологий в промышленность являлась экономическая целесообразность.

Аддитивные технологии предлагают новые возможности при производстве изделия, а также в ряде случаев оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные методы [7]. В отличие от традиционных технологий, в которых процессы изготовления деталей осуществляются методом вычитания материала из заготовки, использование аддитивных технологий подразумевает построение детали путем добавления слоя за слоем до получения готового изделия. Отходы материала по традиционным технологиям обработки деталей иногда превышают 70%, в то время как при использовании аддитивных технологий, этот показатель стремится к нулю.

При внедрении АТ в авиационную промышленность это обеспечило изменение в подходе к конструированию: улучшение массогабаритных и иных функциональных показателей эффективности изделий [8].

«Непосредственное выращивание» изделий методом аддитивных технологий может осуществляться разными способами и с использованием различных материалов, но в основе любого из них лежит принцип

последующего создания (выращивания) твёрдого объекта [7-9]. Приведем классификацию аддитивных технологий. В настоящее время АТ представлены несколькими способами печати, которые различаются исходными материалами и принципом его нанесения (Таблица 1).

По принципу формирования детали выделяют два направления развития аддитивных технологий:

Формирование детали происходит за счет объединения материала, находящегося на рабочей поверхности платформы технологического оборудования (Bed deposition) [10]. Таким образом, формируются детали в селективном лазерном плавлении (СЛП). После окончания процесса изготовления остается некоторый объем материала, который может использоваться для формирования следующей детали.

Формирование деталей путем прямого осаждения материала (Direct deposition). Готовое изделие формируется послойно за счет разогретого до необходимой температуры материала, поступающего на рабочую платформу из специального распределяющего устройства [10]. Такой принцип формирования детали заложен в методе электронно-лучевого сплавления (ЭЛП).

В свою очередь формирование детали путем прямого осаждения (Direct deposition), также можно классифицировать на два метода подачи расходного материала из распределяющего устройства (дозатора). Одним из таких методов является, метод подачи расходного материала в виде порошка. Изготовление детали из порошка приводит к огромным расходам материала, так как порошок, либо разлетается по камере, либо не проплавляется, при 3D-печати. В дальнейшем разлетевшийся порошок нельзя использовать повторно. В связи со всеми этими проблемами, на смену порошку, на рынок современной 3D-печати, приходит более выгодный в экономическом плане, расходный материал в виде проволоки, ничем не уступающий порошку.

*Таблица 1 – Классификация аддитивных технологий в зависимости от исходного материала и его состояния[9]*

Состояние материала	Материалы	Процесс
Жидкое	Полимеры	Стереолитография (SL)
		Изготовление объектов послойной наплавки (FDM)
		Струйная печать (JP)
Порошкообразное	Полимеры, металлы, керамика	3D – печать (3DP)
		Селективное лазерное спекание (SLS)
		Прямое лазерное спекание (DMLS)
		Селективная лазерная плавка (SLM)
	Металлы	Электронно-лучевая плавка (EBM)
		Прямое нанесение металлов (DMD)
		Точное лазерное формирование (LENS)
Твердое	Полимеры, металлы, керамика и композиционные материалы	Послойное изготовление объектов из листового материала (LOM)
		Произвольное экструзионное формирование (EFF)

Титановые сплавы представляют особый интерес для АТ, т.к. производство таких же деталей методами традиционных технологий имеют высокую стоимость.

Из данных приведенных в таблице 1, можно выделить наиболее востребованные технологии в настоящее время, для формирования изделий из титанового сплава ВТ6, такие как селективное лазерное плавление (СЛП – Selective laser melting, SLM) и электронно-лучевое плавление (ЭЛП – Electron melting beam, EBM). Далее подробно рассмотрим каждый из этих методов.

## 1.2 Методы 3D-печати изделий из титановых сплавов

### 1.1.1 Селективное лазерное плавление (СЛП, англ. SLM)

Селективное лазерное плавление (Selective Laser Melting или SLM) – процесс создания детали происходит в результате локального послойного сплавления не только металлических, но и неметаллических материалов (керамика, пластмасса, стекло, нейлон) под действием лазерного излучения [11].

Пошагово технология процесса выглядит следующим образом:

- Специальное программное обеспечение разбивает трехмерную компьютерную модель на слои определенной толщины;
- На рабочую поверхность наносится слой порошка при помощи специального подвижного блока;
- Лазерный луч, в соответствии с 3D-моделью, спекается первый слой;
- Затем рабочая поверхность опускается на толщину слоя, насыпается новый слой порошка, лазер выжигает второй слой объекта поверх первого и т.д. За счет высокой температуры в рабочей камере, происходит сплавление слоев [12-15].

Этот процесс повторяется от слоя к слою до полного создания модели.

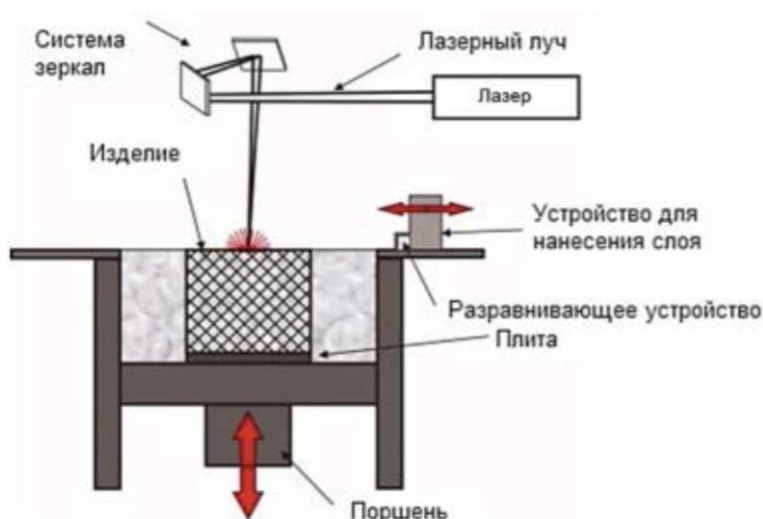


Рисунок 1 – Схематичное изображение установки, работающей по принципу SLM-технологии

Метод SLM позволяет использовать самые разные материалы, в том числе и очень прочные: термопластичные полимеры, стекло, керамику и металлы. Модели, созданные методом селективного лазерного сплавления, считаются одними из самых прочных, среди всех деталей, произведенных по другим аддитивным технологиям [16].

Материалы, которые можно использовать для каждого изделия, зависит от различных факторов – параметров лазерного излучения, возможности создания в рабочей камере защитных газов или вакуума.

Селективное лазерное сплавление нашли применение в следующих сферах:

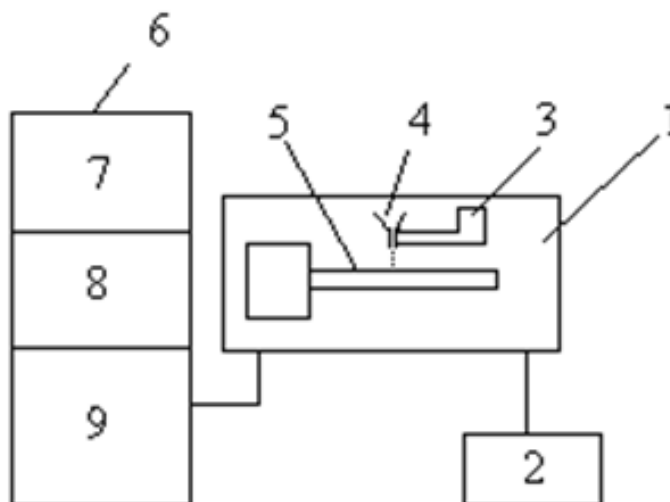
- Аэрокосмическая – производство элементов газовых турбин, двигателей и корпусов летательных аппаратов;
- Медицина – изготовление протезов и имплантатов;
- Мелкосерийное производство – изготовление пресс-форм, заготовок, вставок [11].

#### *1.1.2 Электронно-лучевое плавление (ЭЛП, англ. EBM)*

Теперь немного поближе познакомимся с процессом формирования деталей, который используется в данной работе.

Данная технология зачастую классифицируется как метод быстрого производства. Электронно-лучевая плавка (EBM) схожа с выборочной лазерной плавкой (SLM) – главное отличие данной технологии от SLM заключается в использовании электронных излучателей (т.н. электронных пушек) вместо лазеров в качестве источников энергии для плавки [17]. В основе технологии лежит использование электронных пучков высокой мощности для сплавления металлического порошка в вакуумной камере с образованием последовательных слоев, повторяющих контуры цифровой модели. В отличие от технологий спекания, электронно-лучевая плавка позволяет создавать детали особо высокой плотности и прочности [18].

Блок-схема установки для плавки расходных материалов (порошка или проволоки) показана на рисунке 2 и состоит из вакуумной камеры 1 с откачными средствами 2, механического манипулятора с электроприводом 3, устройства для дозированной подачи порошкового материала в зону расплава 4, электронного источника и схем его электропитания (энергокомплекса) 5. В состав энергокомплекса входят блок питания разряда 6, высоковольтный блок 7, блоки питания фокусирующей катушки и отклоняющей системы 8.



*Рисунок 2 – Блок-схема установки электронно-лучевой наплавки [19]*

Порошковый дозатор 4 обеспечивает стабильную подачу наплавляемого материала в зону действия электронного луча, а блок управления разверткой формирует луч в виде одной или нескольких линий поперёк движения наплавляемого изделия [19].

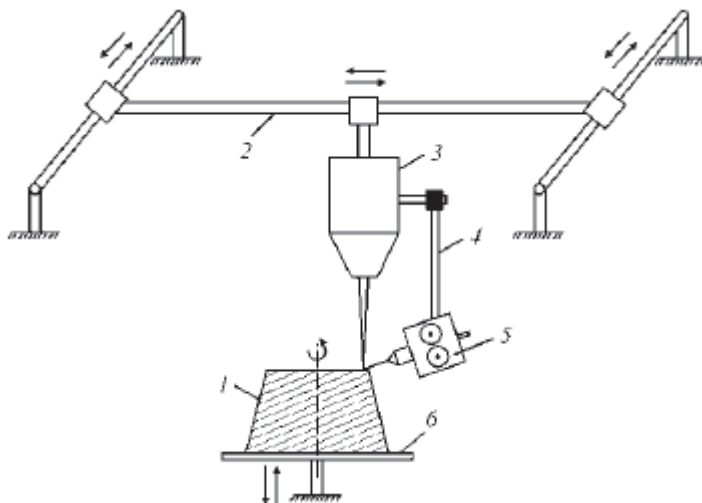
Последовательно этот процесс можно описать следующим образом:

- на специальную платформу насыпают или распыляют металлический порошок и разравнивают его при помощи ножа или валика;
- по координатам, полученным с компьютерной модели, поверхность материала бомбардируется электронами из электронно-лучевой пушки [18-20].

Немало важным здесь является и то, что в одно время можно «облучать» сразу несколько участков материала. Это существенно ускоряет процесс производства изделия.

Вакуум, созданный в камере, имеет давление меньше  $1 \times 10^{-4}$  Бар и способствует процессу нагрева металла, ведь любая газовая или воздушная среда создает для электронов слишком высокое сопротивление. В такой вакуумной среде сохраняются свойства материала, утрачиваемые во время плавки.

Температура в камере во время печати составляет  $640-700^\circ\text{C}$ . За счёт этого вся деталь разогрета равномерно, и процесс охлаждения происходит одновременно по всей поверхности уже после окончания печати [21].



*Рисунок 3 – Схематичное изображение электронно-лучевого 3D-плавления: 1 – изготавливаемое изделие; 2 – манипулятор; 3 – электронно-лучевая пушка; 4 – штанга держателя подающего механизма; 5 – падающий механизм; 6 – поворотный стол с механизмом вертикального перемещения[21]*

Для печати используются наиболее распространённый в аэрокосмической и медицинской сферах титановый сплав ВТ6. Материал представлен в виде гранул размером 20-60 мкм. Преимущества этой технологии неоспоримы. Структура изделий, полученных в результате электронно-лучевого сплавления, выгодно отличается от структуры деталей, изготовленных методом литья. А погрешность составляет всего  $\pm 0,2$  мм на

длине 100 мм. Она вызвана размером электронного пучка, который составляет 0,2-1,0 мм и приводит к небольшой шероховатости готовых изделий [21].

На рисунке 4 приведены характерные микроструктуры сплава ВТ6, и механические свойства этих материалов, полученные различными методами АТ, а также литьем и прокаткой.

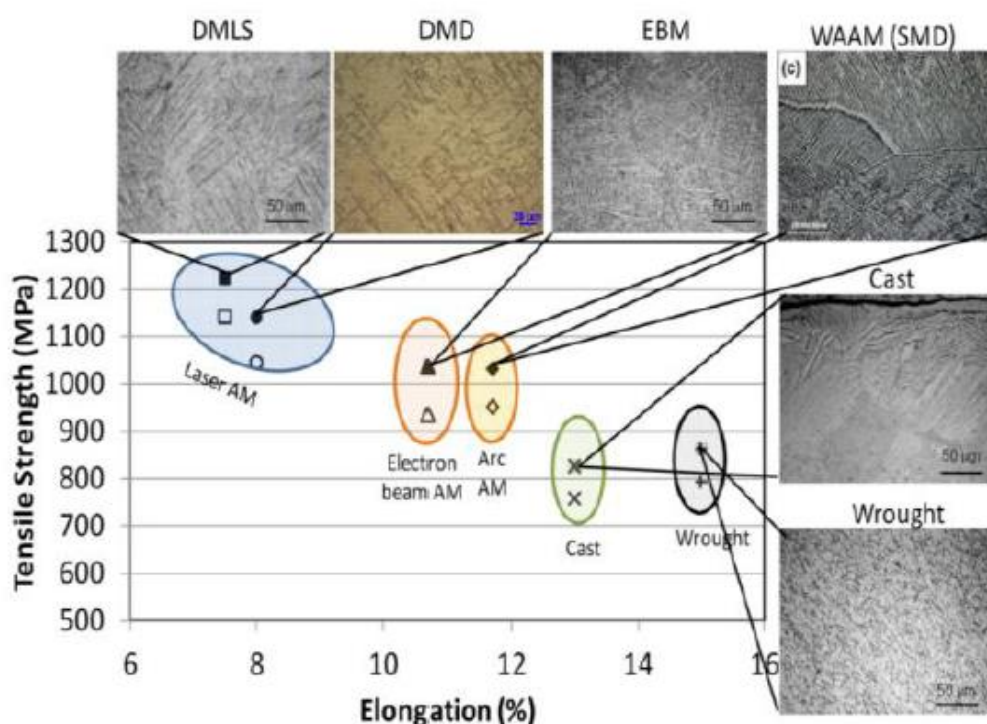


Рисунок 4 – Микроструктуры образцов титанового сплава ВТ6, полученных различными методами, и их механические свойства (DMLS – селективное лазерное плавление; DMD – прямое лазерное выращивание; EBM – электронно-лучевое плавление; WAAM – аддитивное выращивание из проволоки с помощью электрической дуги; Cast – литье; Wrought – пластическая обработка)[22]

Из рисунка 4 видно, что технологии, в которых применяется лазерное излучение, получаемый материал имеет наибольшую прочность и меньшую пластичность по сравнению с другими технологиями. Это можно объяснить образованием мартенситной фазы в результате быстрого охлаждения. В то время как в случае технологии электронно-лучевого плавления, материал имеет довольно не плохие механические свойства, что по прочности, что по



пластичности. Так как технология ЕВМ осуществляется в вакууме, скорости охлаждения ниже и в результате материал имеет ( $\alpha+\beta$ ) микроструктуру.

В работе [22] проведенные исследования механических свойств образцов из титанового сплава ВТ6, полученных методом селективного лазерного плавления, показали, что их свойства отличаются в зависимости от направления выращивания образца. У горизонтально расположенных на платформе образцов, прочностные свойства при испытании на растяжение выше, чем у вертикально расположенных, однако ударная вязкость ниже.

Отличие прочностных свойств образцов может быть связано с присутствием направленных дефектов и особенностями формирующейся микроструктуры материала в процессе СЛП. Таким образом, основными факторами влияющими на механические свойства изделий полученных методом селективного лазерного плавления порошковых материалов являются:

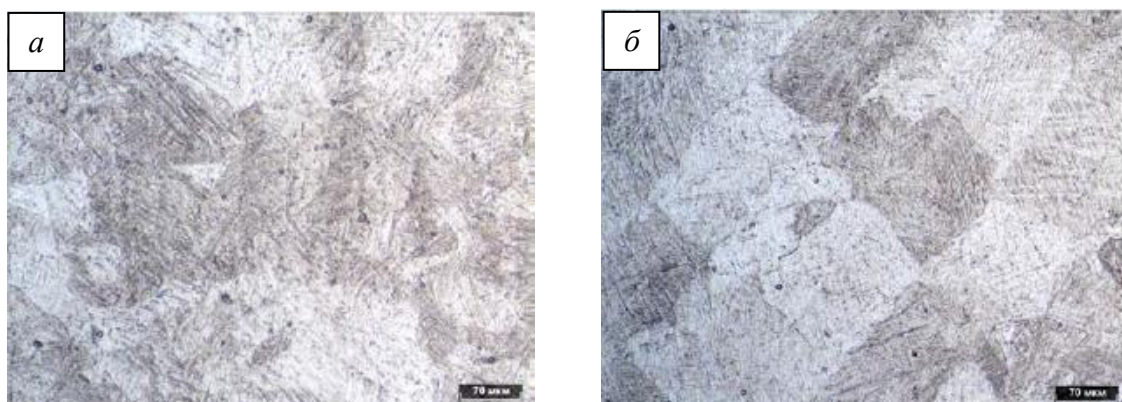
- остаточные напряжения, которые устраняются термической обработкой при 950°С в вакууме;
- плоские поры, расположенные перпендикулярно направлению выращивания;
- вытянутая вдоль направления изготовления зеренная микроструктура [22].

Рентгенофазовый анализ образцов полученных методом СЛП показывает, что в структуре присутствуют  $\alpha'$ - и  $\beta$ - фазы (Таблица 2), наибольшее содержание мартенситной  $\alpha'$ - фазы. Процентное содержание  $\alpha'$ - фазы равно 94,7%, а  $\beta$ - фазы 5,3%.

*Таблица 2 – Результат рентгенофазового анализа образца из титанового сплава ВТ6, изготовленного методом СЛП [22]*

Образец	Качественный состав	Количественный состав, %
Полученный СЛП	$\alpha'$ -фаза	94,7
	$\beta$ -фаза	5,3

Микроструктура образцов полученных методом СЛП представляет собой мелкодисперсные иглообразные выделения мартенситной  $\alpha'$ - фазы (Рисунок 4 , а и б).

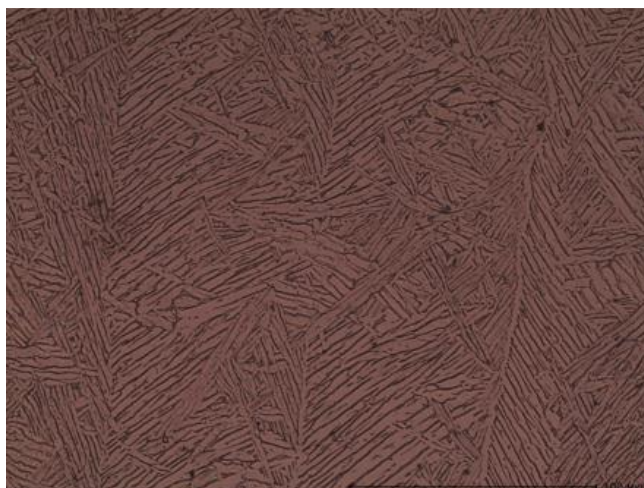


*Рисунок 4 – Микроструктура образца титанового сплава ВТ6 (а и б), полученного методом СЛП [22]*

В [23] работе было проведено исследование структуры и механических свойств титанового сплава ВТ6, после электронно-лучевой перекристаллизации.

Металлографический анализ образца титанового сплава ВТ6, полученного методом электронно-лучевого плавления показал, что ориентировка структуры совпадает с направлением теплоотвода при процессе формирования. Наблюдаемая структура напоминает классическую видманштеттовую структуру (Рисунок 5), характерную для титановых сплавов  $\alpha+\beta$  – сплавов. По границам первичного  $\beta$  – зерна выделяется светлая каемка  $\alpha$ -фазы, а далее  $\beta$  – распадается на переплетенные в виде корзинки  $\alpha$  и  $\beta$  кристаллы равновесного состава [23].

Методом рентгеноструктурного анализа было подтверждено наличие  $\alpha$ - и  $\beta$ - фазы в структуре сплава. Параметры решетки (ГПУ)  $\alpha$ -фазы  $a=2,9225$  Å,  $c=4,6712$  Å, тетрагональность  $c/a$  для  $\alpha$ -фазы равна 1,6. Для  $\beta$ -фазы (ОЦК)  $a=3,2101$  Å. По результатам количественного фазового анализа процентное содержание  $\beta$ -фазы равно 8%, а  $\alpha$ -фазы – 92% [23].



*Рисунок 5 – Структура титанового сплава ВТ6, полученного методом электронно-лучевого плавления [23]*

Значение микротвердости исследуемого образца титанового сплава ВТ6, составило 360HV<sub>0.025</sub>.

*Таблица 3 – Механические характеристики титанового сплава ВТ6, полученного методом ЭЛП [23]*

Образец №	Предел прочности, МПа	Условный предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
1	803	733	10,1	5,6
2	750	694	7,5	7,0
3	780	723	8,8	6,9

### **1.3 Термическая обработка изделий изготовленных методом аддитивных технологий из порошка и проволоки титановых сплавов**

В настоящее время применяются различные виды термической обработки, предназначенные для различных целей. Основными видами ТО являются отжиг, нормализация, закалка и отпуск [24].

Отжиг представляет собой операцию термической обработки, заключающуюся в нагреве титанового сплава ВТ6, выдержке при данной температуре и последующем медленном охлаждении. В результате отжига

образуется устойчивая структура, свободная от остаточных напряжений.

Основные цели отжига:

- снижение твердости и повышение пластичности;
- уменьшение внутренних напряжений;
- снятие хрупкости и повышение сопротивляемости ударной вязкости;
- устранение структурной неоднородности состава материала;

В зависимости от поставленных целей отжиг производится при различных температурах.

В работе [22] было установлено, что после проведения термической обработки образцы, изготовленные в горизонтальном положении, демонстрируют более высокие показатели при испытании на ударный изгиб ввиду устранения влияния остаточных напряжений. Отличие прочностных свойств образцов может быть связано с присутствием направленных дефектов и особенностями формирующейся микроструктуры материала в процессе СЛП.

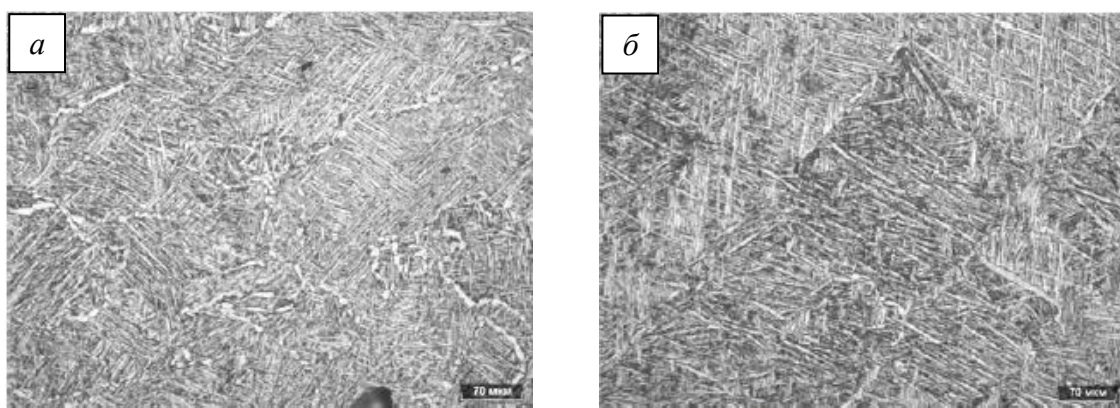
Рентгенофазовый анализ образцов после отжига показывает, что в структуре присутствуют  $\alpha'$ -,  $\alpha$ - и  $\beta$ - фазы, наибольшее содержание мартенситной  $\alpha'$ - фазы. Высокое содержание  $\alpha'$ - фазы после термической обработки говорит о том, что использование режима термической обработки, возможно, является не самым оптимальным в данном случае, поскольку не учитывает исходную нетрадиционную (неравновесную, мелкодисперсную, разнонаправленную) микроструктуру материала, полученного по технологии СЛП.

*Таблица 4 – Результат рентгенофазового анализа образца из титанового сплава ВТ6, до и после термической обработки [22]*

Образец	Качественный состав	Количественный состав, %
До термической обработки	$\alpha'$ -фаза	94,7
	$\beta$ -фаза	5,3
После термической	$\alpha'$ -фаза	73,8

обработки	$\alpha$ -фаза	11,3
	$\beta$ -фаза	14,9

После вакуумного отжига при температуре 950°C наблюдается появление  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз (Рисунок 6, *а* и *б*) в виде свободных от иглообразного мартенсита образований, сформировавших, по-видимому на границах зерен. Можно заметить, что размеры игл мартенсита укрупнились в размерах, границы округлились по сравнению с образцом до термической обработки [22].



*Рисунок 6 – Микроструктура образца титанового сплава ВТ6, после (а и б) термической обработки [22]*

Например, результаты исследований, представленные в работе [25], приводят к следующим выводам:

После термического отжига, столбчатые  $\beta$  – зерна характерные для готового изделия, превращаются в равноосные;

Было замечено, что более высокие скорости охлаждения после термической обработки, дают большое количество мартенситной  $\alpha'$  – фазы, при охлаждении водой со скоростью 650°C/сек, приводит к полностью мартенситной структуре.

Обнаружено, что мартенситная  $\alpha'$  – фаза обладает значительным усиливающим эффектом в материале, однако пластичность сплава резко уменьшилась с количеством  $\alpha'$  – фазы. У термообработанного образца с водяным охлаждением (полностью мартенситная  $\alpha'$  – фаза) прочность на 31%

больше и на 86% меньше пластичность, чем у термообработанного образца с охлаждением в печи ( $\alpha + \beta$  – микроструктура);

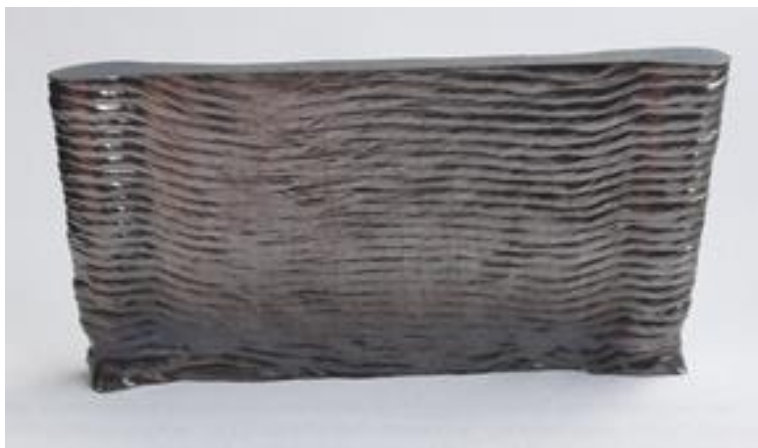
Было показано что механические свойства образца титанового сплава ВТ6, полученного методом ЭЛП, можно изменять путем регулирования скорости охлаждения, температурой и временем термообработки.

Таким образом, оптимизированная термообработка должна быть выбрана в зависимости от характера применения. Особое внимание должно быть уделено воздействию термической обработки на структурные и механические свойства.

## Глава 2. Материалы и методика эксперимента

### 2.1 Технологические параметры 3D-печати

В данной работе электронно-лучевому плавлению подвергались порошок и проволока титанового сплава ВТ6. В исходном порошке размер частиц составлял от 380 до 500 мкм. Нижний предел размера частиц (380 мкм) обеспечивает нормальный режим работы установки: частицы меньшего размера разлетаются по камере, попадая на катод. Диаметр проволоки составлял 1,6 мм. На рисунке 7 приведено изображение стенки, полученной методом ЭЛП проволоки из титанового сплава ВТ6. Образцы для исследования, изготавливались из данного изделия.



*Рисунок 7 – Изображение стенки, полученной методом ЭЛП проволоки титанового сплава ВТ6*

Технологические параметры для изготовления изделий из порошка титанового сплава ВТ6:

В камере для изготовления образцов предварительно откачивается воздух, для получения вакуума до  $10^{-4}$  Па (Таблица 5). Режим, при котором изготавливались образцы из порошка, источником электронов является термоэмиссионный вольфрамовый катод. Электроны ускоряются разностью потенциалов 30 кВ и фокусируются на поверхности порошка в пятно, в виде эллипса. Масштаб пятна составил 8 мм по оси X и 3 мм по оси Y, размер пятна зависит от мощности электронного пучка, а мощность электронного пучка в свою очередь зависит от тока катода, для данного масштаба он составил 20 мА. Скорость движения стола была рассчитана, и составила 9,5

мм/с. Движение стола по оси Z составило 1 мм за каждый проход (после каждого проплавленного слоя, опускается на данную высоту). Время подачи порошка  $\tau = 25$  мкс. Перед нанесением каждого следующего слоя порошка, предыдущий, также разогревается пучком электронов.

Технологические параметры для создания изделий из проволоки титанового сплава ВТ6:

В камере получают вакуум  $\sim 10^{-4}$  Па (Таблица 5). Режим, при котором изготавливают образцы из проволоки, источником электронов является также термоэмиссионный вольфрамовый катод, ток которого равен 18 мА. Ускоряющее напряжение электронов равно 30 кВ. Луч представляет собой эллипс, масштаб луча по оси X = 4 мм, по оси Y = 1 мм. Перемещение стола по оси Z за один проход составила 1,2 мм. Скорость движения стола равна 7,3 мм/с. Скорость подачи проволоки составила 14,6 мм/с.

*Таблица 5 – Технологические параметры 3D-печати*

Наименование технологического параметра	Значение технологического параметра		Единицы измерения
	Порошок	Проволока	
Вакуум	$10^{-4}$	$10^{-4}$	Па
Ток катода	20	18	мА
Ускоряющее напряжение	30	30	кВ
Масштаб луча	X = 8 Y = 3	X = 4 Y = 1	мм
Скорость подачи	—	14,6	мм/с
Время подачи	25	—	мкс
Скорость движения стола	9,5	7,3	мм/с
Перемещение стола по Z	1	1,2	мм



## **2.2 Методы подготовки и исследования 3D-напечатанных образцов**

Материалом исследования является двухфазный  $\alpha + \beta$  сплав титана ВТ6. Исследовались пять образцов титанового сплава ВТ6: образец полученный методом прокатки, образец полученный методом электронно-лучевого плавления порошка до и после отжига и образец полученный методом электронно-лучевого плавления проволоки до и после отжига. Отжиг проводился при температуре 900°С в течение 1 часа в вакууме.

Для измерения твердости методом Виккерса требуется тщательная подготовка поверхности – тонкого шлифования и полировки. Так как шероховатость образцов была большой, они проходили дополнительную обработку поверхности. Шлифовка проводилась с помощью наждачной бумаги. Маркировка шлифовальных шкур, которые использовались для подготовки поверхности Р 80, Р 360, Р 600, Р 1000 и Р 2000. Полировка проводилась с помощью полировальной пасты.

Измерение микротвердости  $H_{\mu}$  исследуемых образцов выполняли на микротвердомере ПМТ – 3 с использованием пирамидки Виккерса (нагрузка на индентор составляла 50 г).

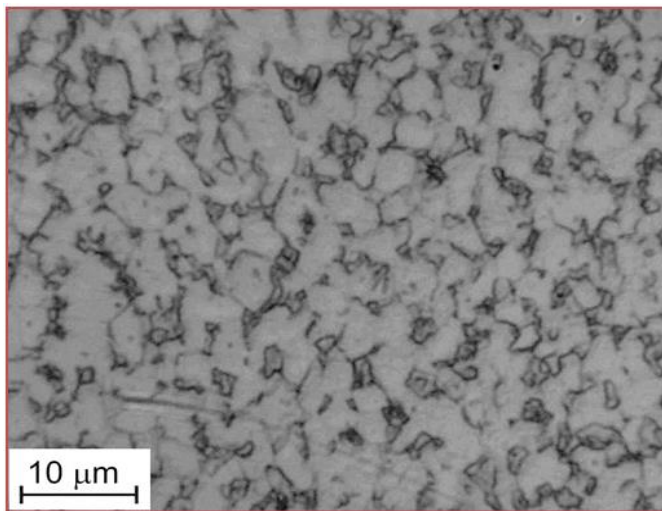
Металлографические исследования образцов проводили с использованием оптического микроскопа ZEISS AXIOVERT 25. Прежде чем посмотреть структуру образцы подвергли травлению кислотой.

Исследование фазового состава и структурных параметров образцов титана ВТ 6 проводилось на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 на  $\text{CuK}_{\alpha}$ -излучения. Анализ фазового состава проведен с использованием баз данных PCPDFWIN, а так же программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.5.

## Глава 3. Экспериментальная часть

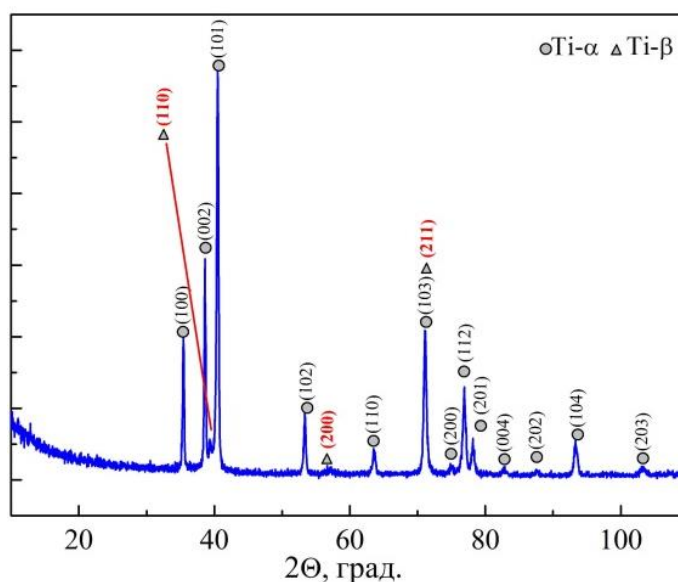
### 3.1 Исследование микроструктуры и механических свойств образцов из титанового сплава ВТ6

Проведенный металлографический анализ показывает, что микроструктура образца титанового сплава ВТ6, полученного традиционным методом, а именно прокаткой, представляет собой равноосные зерна, размер которых варьируется от 1 до 3 мкм (Рисунок 8). Методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что представленные зерна характеризуются ГПУ решеткой ( $\alpha$ -фазой).  $\beta$ -фаза расположена по границам  $\alpha$ -зерен, преимущественно в тройных стыках.



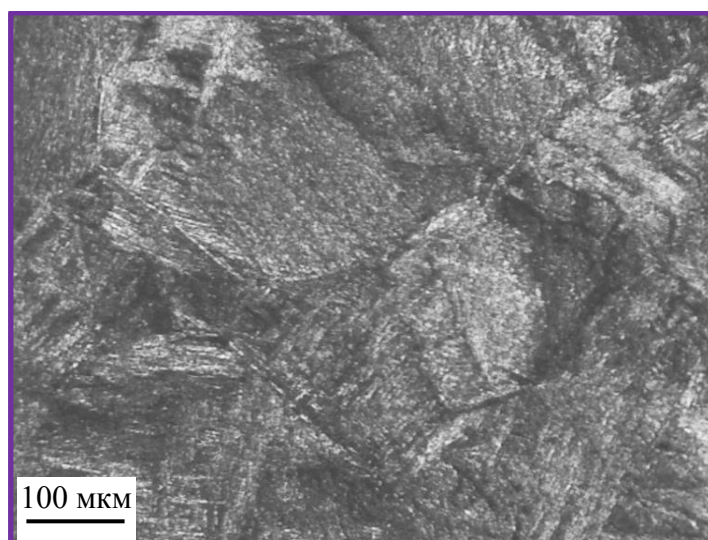
*Рисунок 8 – Оптическое изображение микроструктуры титанового сплава ВТ6, полученного методом прокатки*

Проведенный рентгеноструктурный анализ показал, что в титановом сплаве ВТ6 в прокатанном состоянии присутствуют  $\alpha$ - и  $\beta$ - фазы (Рисунок 9). Объемная доля  $\alpha$ -фазы равна 92,5%, а  $\beta$ -фазы – 7,5%. Также рассчитаны параметры решетки: для (гексагональная плотноупакованная)  $\alpha$ -фазы  $a = 2,9280 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,6628 \text{ \AA}$  (Таблица 6), тетрагональность  $c/a$  для  $\alpha$ -фазы равна 1,5924, что превышает значение  $c/a$ , для известных литературных источников 1,5870. Для  $\beta$ -фазы параметр решетки (объемно-центрированная)  $a = 3,2469 \text{ \AA}$ .



*Рисунок 9 – Рентгенограмма образца титанового сплава ВТ6, полученного методом прокатки*

Металлографический анализ показал, что при 3D-печати образцов из порошка титанового сплава ВТ6, образуются равноосные зерна средний размер которых 200-300 мкм (Рисунок 10), т.е. в 100 раза больше, чем в образце полученном традиционным методом. Внутри зерен наблюдается пластинчатая морфология, при чем поперечный размер пластинок достигает 5 микрон.

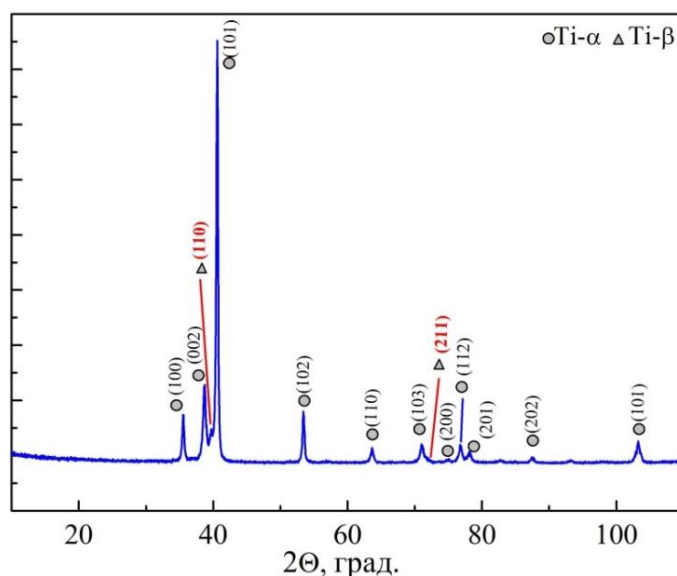


*Рисунок 10 – Оптическое изображение микроструктуры 3D-напечатанного образца, полученного методом ЭЛП порошка титанового сплава ВТ6*

Методом рентгеноструктурного анализа был исследован образец, полученный плавлением порошка титанового сплава ВТ6. Было подтверждено наличие  $\alpha$ - и  $\beta$ - фазы в структуре сплава (Рисунок 11). По результатам количественного фазового анализа процентное содержание  $\beta$ - фазы равно 3%, а  $\alpha$ -фазы – 97%.

Рассчитаны параметры решетки:

Для  $\alpha$ -фазы (гексагональная плотноупакованная)  $a = 2,9339 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,6767 \text{ \AA}$  (Таблица 6), тетрагональность  $c/a$  для  $\alpha$ -фазы равна 1,5940, что соответственно больше табличного значения 1,5870. Для  $\beta$ -фазы параметр решетки (объемно-центрированная)  $a = 3,2383 \text{ \AA}$ .



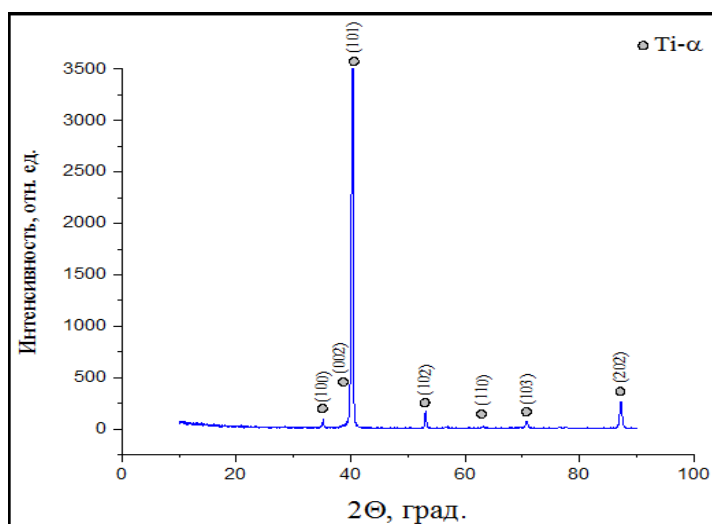
*Рисунок 11 – Рентгенограмма 3D-напечатанного образца, полученного методом ЭЛП порошка титанового сплава ВТ6*

На рисунке 12 представлена металлографическая структура сплава ВТ6, полученного методом ЭЛП проволоки. Из рисунка видно, что исследуемый образец состоит из столбчатых зерен, рост которых направлен в сторону противоположенную направлению теплоотвода. Поперечный размер столбчатых зерен составил 1 мм, а их продольный размер ограничивается размером создаваемого изделия. Внутри зерен наблюдается игольчатый мартенсит, а также мартенситные пластины разной ориентации. Поперечный размер игл и пластин варьируется от 3 до 5 микрон.



*Рисунок 12 – Оптическое изображение микроструктуры 3D-напечатанного образца, полученного методом ЭЛП проволоки титанового сплава BT6*

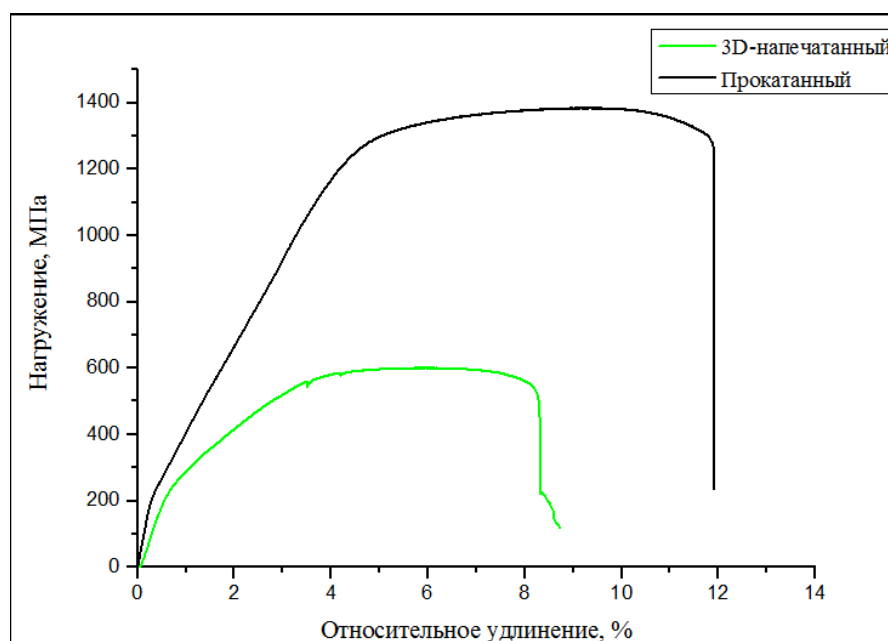
Проведенный рентгеноструктурный анализ показал, что в образце титанового сплава BT6, полученном методом плавления проволоки присутствуют только  $\alpha$ -фаза (Рисунок 13). Что не характерно для данного сплава. Рассчитаны параметры решетки: для (гексагональная плотноупакованная)  $\alpha$ -фазы  $a = 2,9245 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,6637 \text{ \AA}$  (Таблица 6), тетрагональность  $c/a$  для  $\alpha$ -фазы равна 1,5946, что превышает значение  $c/a$ , для известных литературных источников 1,5870.



*Рисунок 13 – Рентгенограмма 3D-напечатанного образца, полученного методом ЭЛП из проволоки титанового сплава BT6*

В работе была экспериментально измерена микротвердость исследуемых образцов сплава ВТ6. Значение микротвердости прокатанного образца составляло  $H_\mu = 3200$  МПа (Таблица 6). В 3D-напечатанном образце из порошка сплава ВТ6, микротвердость достигла 4200 МПа, а из проволоки того же сплава, составила 3100 МПа.

Испытания на одноосное статическое растяжение показали, что кривая  $\sigma$ – $\epsilon$  прокатанного образца титанового сплава ВТ6, хорошо согласуется с известными литературными данными, прочность составила 1400 МПа, а относительное удлинение 12% (Рисунок 14).



*Рисунок 14 – Кривая растяжения титанового сплава ВТ6, полученного методом ЭЛП проволоки (зеленая) и традиционным методом (черная)*

Прочность 600 МПа и относительное удлинение 8% (Рисунок 15) 3D-напечатанного образца из проволоки, в свою очередь, оказывается существенно ниже значения характерного для сплава ВТ6. Последнее связано с большим количеством наличием пор в образце. Причиной образования пор является скачки напряжения в электронной пушке, при формировании изделия. На рисунке 15 видно, что разрушение образца произошло именно в местах, где имеются поры.





*Рисунок 15 – Изображение образца после испытаний на растяжение*

### **3.2 Влияние термической обработки на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства 3D-напечатанных образцов методом ЭЛП**

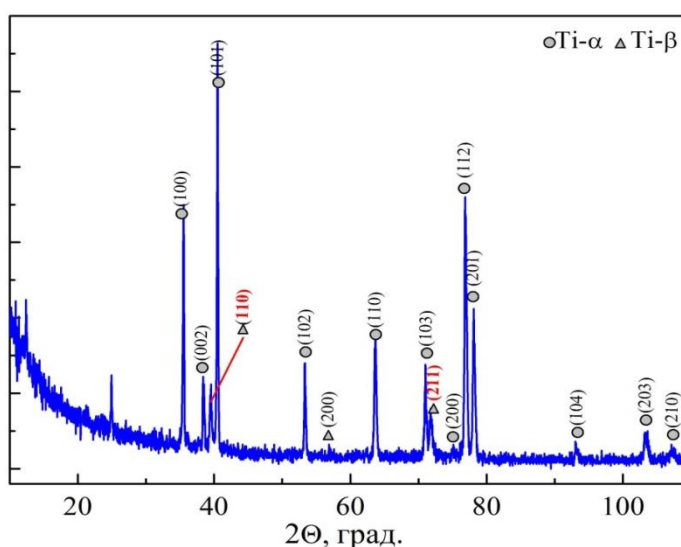
Для исследования термической стабильности был произведен отжиг при 900°C в течение одного часа в вакууме. Установлено что отжиг 3D-напечатанных образцов, полученных путем плавления как порошка, так и проволоки, не вызывает изменений морфологии зерен, но приводит к существенному увеличению размеров зерен.

Как видно из рисунка 16, отжиг 3D-напечатанного образца титанового сплава ВТ6, полученного путем плавления порошка соответствующего состава, приводит к не большому увеличению размера зерна до 300-500 мкм. Следует отметить, что поперечные размеры пластин внутри зерен также увеличились до 15 микрон.



*Рисунок 16 – Оптическое изображение микроструктуры 3D-напечатанного образца из порошка сплава ВТ6, подвергнутого отжигу при температуре 900°C в течение 1 часа в вакууме*

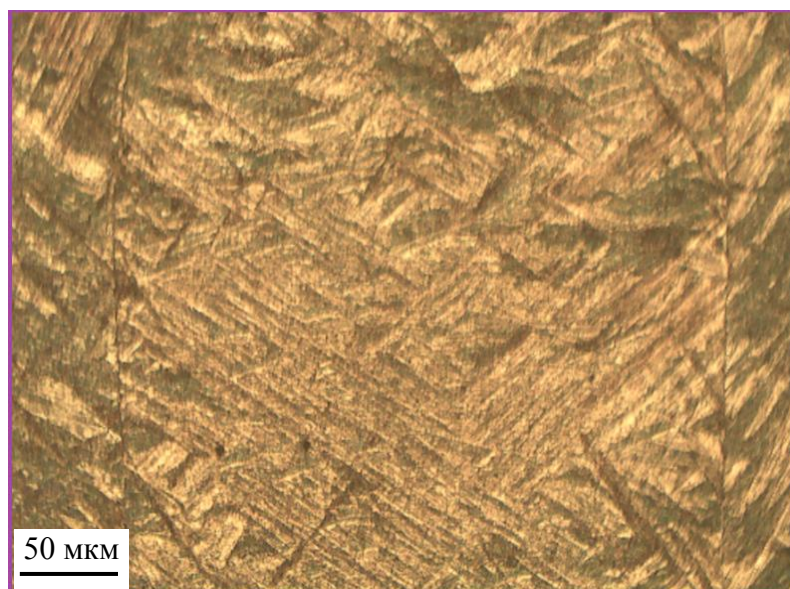
Результаты рентгеноструктурного анализа образца, полученного методом ЭЛП порошка, и подвергнутого отжигу, подтвердили наличие  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз. Результаты количественного фазового анализа показали, что отжиг приводит к увеличению объемной доли  $\beta$ -фазы до 9%, о чем свидетельствует увеличение интенсивности пика  $\beta$ -фазы на угле (40°) (110) (Рисунок 17). Были рассчитаны параметры решетки (ГПУ)  $\alpha$ -фазы  $a = 2,9241 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,6751 \text{ \AA}$  (Таблица 6). Для  $\beta$ -фазы параметр решетки (ОЦК)  $a = 3,2223 \text{ \AA}$ .



*Рисунок 17 – Рентгенограмма 3D-напечатанного образца из порошка титанового сплава ВТ6, полученная после отжига при температуре 900 °C в течение 1 часа в вакууме*

Металлографический анализ для отожженного образца, полученного методом ЭЛП проволоки, представлен на рисунке 18. В отличие от образца полученного методом плавления порошка, образец из проволоки обладает относительно высокой термической стабильностью, микроструктура не претерпевает значительных изменений, отжиг не привел к изменению поперечного размера зерна. Однако привел к увеличению внутринней игольчатой морфологии, средний поперечный размер игл составил 20 мкм.





*Рисунок 18 – Оптическое изображение микроструктуры 3D-напечатанного образца из проволоки сплава ВТ6, подвергнутого отжигу при температуре 900°С в течение 1 часа в вакууме*

Получить результаты рентгеноструктурного анализа не удалось, в связи с наличием огромных размеров зерен в образце. Зерно не попало в отражающее положение для рентгеновского излучения.

Высокая термическая стабильность образца полученного путем плавления проволоки наглядно проявляется при исследовании микротвердости. Как видно из таблицы 6 микротвердость образца из проволоки уменьшилась всего на 100 МПа, а для образца из порошка на 700 МПа

Отжиг 3D-напечатанных образцов при температуре 900°С в течение 1 часа в вакууме, приводит к снижению микротвердости, до 3500 МПа, для образца полученного из порошка титанового сплава ВТ6, а для образца из проволоки этого же сплава, снизилось значение микротвердости до 2900 МПа.

*Таблица 6 – Характеристики исследованных образцов*

Образец	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, Об. %	Параметры решетки, Å	Микротвердость, МПа
Прокатанный сплав ВТ6	Ti- $\alpha$	92,5	a = 2,9280 c = 4,6628	3200
	Ti- $\beta$	7,5	a = 3,2469	
3D-напечатанный ВТ6 из порошка	Ti- $\alpha$	97	a = 2,9339 c = 4,6767	4200
	Ti- $\beta$	3	a = 3,2383	
3D-напечатанный ВТ6 из порошка + отжиг в вакууме при 900°C в течение 1 часа	Ti- $\alpha$	91	a = 2,9241 c = 4,6751	3500
	Ti- $\beta$	9	a = 3,2223	
3D-напечатанный ВТ6 из проволоки	Ti- $\alpha$	100	a = 2,9245 c = 4,6637	3100
3D-напечатанный ВТ6 из проволоки + отжиг в вакууме при 900°C в течение 1 часа				3000

## **Заключение**

По результатам исследований, представленных в данной работе, можно сделать следующие выводы:

### **1. Титановый сплав ВТ6:**

Микроструктура 3D-напечатанного образца, полученного методом ЭЛП порошка, характеризуется более крупными равноосными зернами (200 мкм) с игольчатой морфологией внутри, а 3D-напечатанный образец, полученный методом плавления проволоки, имеет крупные столбчатые зерна, поперечный размер которых (1 мм), что в разы больше, чем в прокатанном (1-3 мкм).

Объемная доля  $\beta$ -фазы в 3D-напечатанном образце, полученном плавлением порошка не превышает 3%, что существенно меньше, чем в прокатанном образце (7,5%). В то время как, в 3D-напечатанном образце из проволоки, объемная доля  $\beta$ -фазы не была обнаружена.

Микротвердость 3D-напечатанного образца из порошка, превышает микротвердость прокатанного образца в 1,3 раза. А микротвердость 3D-напечатанного образца из проволоки приблизительно равна микротвердости прокатанного.

### **2. Термическая стабильность**

Отжиг при 900 °С в вакууме в течение 1 часа увеличивает размеры зерен 3D-напечатанного образца из порошка титанового сплава ВТ6, а в образце, полученном методом плавления проволоки, не привел к изменениям размеров зерен, однако привел к одинаковой ориентации игл и пластинок.

Отжиг приводит к увеличению объемной доли  $\beta$ -фазы (9%) в 3D-напечатанном из порошка образце, что приблизительно схоже с объемной долей  $\beta$ -фазы в прокатанном образце.

3D-напечатанный образец из проволоки обладает наибольшей термической стабильностью, в сравнении с 3D-напечатанным образцом из порошка. Значение микротвердости 3D-напечатанных образцов

приближается к значению микротвердости образца полученного традиционным методом.

## **Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **Введение**

В процессе поиска источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов, оценка коммерческой ценности работы является необходимым условием. При этом разработчики должны представить настоящее состояние и перспективы проводимых ими научных исследований.

Помимо превышения технических параметров над предыдущими разработками необходимо понимать коммерческую привлекательность научного исследования.

Целью выполнения финансово-экономической части выпускной квалификационной работы является формирование навыков оценки результата научной работы и поиск источников финансирования для проведения научного исследования.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести SWOT-анализ данного исследования;
- 2) определить структуру работ в рамках научного исследования;
- 3) определить трудоемкость выполнения работ;
- 4) разработать график проведения научного исследования;
- 5) оценить бюджет научно-технического исследования.

#### **4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

##### *4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования*

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

В рамках данной научно-исследовательской работы был проведен сравнительный анализ механических свойств, фазового состава и микроструктуры образцов, титанового сплава ВТ6, полученные методами прокатки, электронно-лучевым сплавлением порошка и проволоки, и в дальнейшем подвергнутые термическому отжигу. Целью измерений стало выявление механических свойств 3D-напечатанных образцов из титанового сплава ВТ6.

Результаты проведенного исследования представляют ценность для научных групп, применяющих аддитивные технологии в абсолютно любой отрасли. Например, это может быть мелкосерийное производство (изготовление пресс-форм, заготовок, вставок), медицина (изготовление протезов и имплантов) или аэрокосмическая (производство элементов газовых турбин, двигателей и корпусов летательных аппаратов) и т.д.

Таким образом, многие ученые-экспериментаторы заинтересованы в изучении механических свойств 3D-напечатанных изделий, в получении в максимально короткие сроки очень точной детали, для использования в своих практических целях.

#### 4.1.2. Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

$B_{к1}$  – метод, использовавшийся в данной работе электронно-лучевое сплавление

$B_{к1}$  – изготовление деталей методом селективного лазерного спекания (СЛС)

$B_{к2}$  – изготовление деталей методом прокатки

Таблица 7 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{к1}$	$B_{к2}$	$K_{\phi}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Классы материалов для использования	0,2	5	3	3	1	0,6	0,6
2. Удобство в эксплуатации	0,25	5	5	3	1,25	1,25	0,75
3. Уровень шума работы установки	0,1	4	4	2	0,4	0,4	0,2
4. Качество изделий	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
5. Простота в эксплуатации	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
6. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Цена изготавливаемой продукции	0,15	3	2	2	0,45	0,3	0,3
<b>Итого:</b>	<b>1</b>	<b>46</b>	<b>43</b>	<b>38</b>	<b>4,4</b>	<b>3,85</b>	<b>3,05</b>

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 7, подбираются, исходя из

выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

$$K_{\phi} = 0,2 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 3 = 4,4$$

$$K_{K1} = 0,2 \cdot 3 + 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 2 = 3,85$$

$$K_{K2} = 0,2 \cdot 3 + 0,25 \cdot 3 + 0,1 \cdot 2 + 0,1 \cdot 3 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 2 = 3,05$$

Как видно из приведенных расчетов, наиболее конкурентоспособен другой метод аддитивных технологий изготовления деталей (селективное лазерное спекание).

#### 4.1.3. SWOT-анализ

**SWOT** – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

В таблице 8, представлены SWOT-анализа.



Таблица 8 - Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1. Легкий интерфейс использования С2. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями С3. Процесс работы на установке автоматизирован С4. Изготовление деталей с погрешностью в размерах на $\pm 0,2$ мм на каждые 100 мм (высокоточная производство)	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> Сл1. Установка не транспортабельна из-за больших габаритов Сл2. Изготовление деталей исключительно в вакууме Сл3. Длительный процесс подготовки установки к работе из-за больших температур в камере Сл4. Большие затраты на приобретение расходного материала
<b>Возможности:</b> В1. Легкость управления мощностью электронного пучка позволяет использовать разнообразные режимы плавки В2. Возможность использовать расходный материал в виде проволоки и порошка В3. Технология может применяться в любом мелкосерийном производстве. В4. В аэрокосмической сфере детали, изготовленные методом электронно-лучевого сплавления, отличаются высокой прочностью и имеют небольшой вес	Наличие необходимых материалов и оборудования, а также персонала в процессе исследований может способствовать повышению производительности в будущем.	Для повышения спроса на изготовленную продукцию необходимы квалифицированные кадры среди потенциальных потребителей
<b>Угрозы:</b> У1. Периодическая неисправность электронной пушки У2. Недостаток квалифицированных специалистов У3. Неумышленное совершение НСД. У4. Несвоевременное финансирование научного исследования при дальнейшем развитии проекта	Периодическая неисправность электронной пушки может способствовать к изготовлению брака, так как процесс автоматизирован, исправить это уже во время работы не возможно.	Низкий уровень проникновения на рынок способствует несвоевременному финансированию научного исследования при дальнейшем развитии проекта.

## 4.2. Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Для дальнейшей оценки экономической эффективности составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и распределение исполнителей по видам работ (Таблица 9).

*Таблица 9 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей*

Основные этапы	№ работы	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка задания на НИР	1	Составление и утверждение задания	Руководитель, студент-дипломник
<b>Проведение НИР</b>			
Выбор направления исследования	2	Изучение поставленной задачи и поиск материалов по теме	Студент-дипломник
	3	Выбор методов исследования	Руководитель, студент-дипломник
	4	Календарное планирование работ	Руководитель, студент-дипломник
Теоретические и экспериментальные	5	Подготовка образцов для исследования	Студент-дипломник

исследования	6	Проведение экспериментов	Студент-дипломник
Обобщение и оценка результатов	7	Анализ полученных результатов, выводы	Руководитель, студент-дипломник
	8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, студент-дипломник
Оформление полученных в НИР результатов	9	Составление пояснительной записки	Студент-дипломник

#### 4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ож}$  используется следующая формула:

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (2)$$

где  $t_{ож}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения работы чел.-дн.;  $t_{min}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;  $t_{max}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое

вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_p = \frac{t_{ож}}{Ч}, \quad (3)$$

где  $T_p$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;  $t_{ож}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.  $Ч$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

#### 4.2.3. Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

**Диаграмма Ганта** – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_k = T_p \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4)$$

где  $T_k$  – продолжительность выполнения работы в календарных днях;  $T_p$  – продолжительность выполнения работы в рабочих днях;  $k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;  $T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;  $T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_k$  необходимо округлить до целого числа.

Таблица 10 – Временные показатели проведения ВКР

№ Раб.	Исполнители	Продолжительность работ				
		$t_{min}$ чел-дн	$t_{max}$ чел-дн	$t_{ож}$ чел-дн	$T_p$ раб. дн	$T_k$ кал. дн
1	Руководитель, студент-дипломник	3	10	6	3	4
2	Студент-дипломник	10	30	18	18	22
3	Руководитель, студент-дипломник	7	15	10	5	6
4	Руководитель, студент-дипломник	8	18	12	6	7
5	Студент-дипломник	8	15	10	10	12
6	Студент-дипломник	11	26	17	17	21
7	Руководитель, студент-дипломник	8	18	12	6	7
8	Руководитель, студент-дипломник	7	15	10	5	6
9	Студент-дипломник	8	14	10	5	6
<b>Итого:</b>		<b>Руководитель</b>			<b>25</b>	<b>30</b>
		<b>Студент-дипломник</b>			<b>75</b>	<b>91</b>

На основе таблицы 10 строятся календарный план-график. График строится, для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе таблицы с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.



### 4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- 1) материальные затраты НТИ;
- 2) затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- 3) основная заработная плата исполнителей темы;
- 4) дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- 5) отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- 6) затраты научные и производственные командировки;
- 7) контрагентные расходы;
- 8) накладные расходы.

Остановимся более подробно на расчетах основных затрат.

#### 4.3.1. Расчет материальных затрат НТИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта. В эту статью входят затраты на сырье, материалы, используемые в процессе НИР, комплектующие изделия и т.д. В материальные затраты также включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. Однако их учет ведется в данной статье только в том случае, если в организации их не включают в расходы на использование оборудования или накладные расходы. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы. Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m Ц_i \cdot N_{расх\ i} , \quad (6)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;  $N_{рас.xi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);  $Ц_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);  $k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, занесены в таблице 12.

*Таблица 12 – Материальные затраты*

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед. руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Проволока	Кг	3	6500	19500
Порошок	Кг	5	5500	27500
Интернет	М/бит	1	350	350
Канцелярские товары	Шт.			1500
<b>Итого:</b>				<b>48850</b>

#### *4.3.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ*

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде



случаев по договорной цене. При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены.

В данной работе использовалось уже имеющееся оборудование, и закупка специального оборудования не производилась. В таком случае затраты на специальное оборудование отсутствуют.

Однако в ходе эксплуатации основного оборудования средства были затрачены в соответствии с амортизационными отчислениями.

Так, расчет амортизационных отчислений производился линейным методом, результаты расчетов сведены в таблицу 13.

*Таблица 13 – Амортизационные расходы*

№	Наименование оборудования	Стоимость, руб.	Срок полезного использования, лет	Норма амортизации, %	Срок эксплуатации, дней	Амортизационные расходы, руб
1.	ЭЛУ 5	4500000	10	10	64	114741
2.	Дифрактометр Shimadzu XRD-7000	740000	7	14	45	18573,7
3.	Микротвердомер ПМТ – 3	145000	10	10	59	3408,4
4.	Оптический микроскоп ZEISS AXIOVERT 25	500000	10	10	64	12749
<b>Итого:</b>						<b>149472,1</b>

#### *4.3.3. Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы*

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты)

и дополнительную заработную плату. Заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (7)$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата;  $З_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $З_{осн}$ ).

Основная заработная плата ( $З_{осн}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p, \quad (8)$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. );  $З_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб. Для профессора она составляет 36800 руб., для инженера – 9893 руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}, \quad (9)$$

где  $З_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года, при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (Таблица 14).

*Таблица 14 – Баланс рабочего времени*

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент-дипломник
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	66	66
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48	48
Длительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (10)$$

где  $З_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $З_{\text{тс}}$ );  $k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от  $З_{\text{тс}}$ );  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20-30% от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в таблицу 15.

*Таблица 15 – Расчет основной заработной платы.*

Исполнители	Оклад	$k_{\text{р}}$	$З_{\text{м}}$ руб.	$З_{\text{дн}}$ руб.	$T_{\text{р}}$ раб. дни	$З_{\text{осн}}$ руб.
Руководитель	36800	1,3	47840	1982	25	49550
Студент-инженер	9893	1,3	12860	532	75	39900
<b>Итого:</b>						<b>89450</b>

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} + З_{\text{осн}}, \quad (11)$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

В данный раздел включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

$$З_{\text{доп}} = 0,12 \cdot 89450 = 10734 \text{ руб.}$$

Тогда заработная плата будет равна:

$$З_{\text{зп}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} = 89450 + 10734 = 100184 \text{ руб.}$$

#### 4.3.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{доп}} + З_{\text{осн}}), \quad (12)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным закона от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в табличной форме (Таблица 16).

*Таблица 16 – Отчисления во внебюджетные фонды*

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата (12% от основной), руб.
Руководитель	49550	5946
Студент-дипломник	39900	4788
Коэффициент отчислений	0,271	

<b>Итого:</b>	<b>27149,9</b>
---------------	----------------

#### 4.3.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 17.

*Таблица 17 – Расчет бюджета затрат НТИ*

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты НТИ	48850
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	149472,1
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	89450
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	10734
Отчисления во внебюджетные фонды	27149,9
Бюджет затрат НТИ	325656

## 4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

### 4.4.1. Определение ресурсной эффективности исследования

Интегральный показатель ресурсной эффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i b_i, \quad (13)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;  $b_i$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;  $n$  – число параметров сравнения.

В качестве возможных вариантов исполнения выберем реализованный способ, а также два альтернативных варианта:

1) вариант с закупкой оборудования у сторонних организаций и последующее выполнение работ по его самостоятельному монтажу и использованию в рамках НТИ;

2) вариант с закупкой оборудования и заказом на выполнение работ по его монтажу и вводу в эксплуатацию у сторонней организации.

Основным лимитирующим фактором в представленном НТИ являлась его стоимость. Покупка оборудования у сторонней организации сократила бы рабочее время исполнителей темы, однако, привнесла бы дополнительную статью расхода в размере 5885000 руб. Третий представленный вариант является еще более невыгодным в отношении стоимости проекта. В затраты в этом случае войдут основная и дополнительная заработные платы для высококвалифицированных инженеров, соответствующие отчисления во внебюджетные фонды, а также затраты на оформление для них производственных командировок.

*Таблица 18 – Сравнительная оценка вариантов исполнения исследования*

Объект исследования Критерии	Весовой коэф-т параметра	(Исп.1) Выполнение работы в рамках НТИ с соответствующ ими затратами (реализованное исполнение)	(Исп.2) Покупка оборудования и выполнение остальной работы в рамках НТИ	(Исп.3) Покупка оборудования и заказ на выполнение работы сторонней организацией
Цена	0,35	5	3	1

Продолжительность исследования	0,25	4	4	5
Качество исследования	0,2	4	4	5
Точность результатов исследования	0,2	5	5	5
<b>Итого:</b>	<b>1</b>	<b>20</b>	<b>16</b>	<b>20</b>

Проведем расчет интегрального показателя ресурсоэффективности для каждого варианта исполнения:

$$I_{p-\text{исп1}} = 5 \cdot 0,35 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 = 4,55$$

$$I_{p-\text{исп2}} = 3 \cdot 0,35 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 = 3,85$$

$$I_{p-\text{исп1}} = 1 \cdot 0,35 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 = 3,6$$

Из рассчитанных значений видно, что вариант исполнения, который реализован в данной работе наиболее ресурсоэффективный.

## **Глава 5. Социальная ответственность**

### **Ведение**

Условия труда считаются безопасными, если воздействие вредных или опасных производственных факторов не превышает установленные нормативы.

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда. Охрана труда – система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Охрана труда и безопасность жизнедеятельности регулируется рядом различных нормативно-правовых, законодательных актов, в том числе Трудовым Кодексом Российской Федерации, Кодексом об административных нарушениях, Уголовным Кодексом и Конституцией РФ.

В рамках данной работы проводился сравнительный анализ образцов титанового сплава ВТ6, полученных методом аддитивных технологий. При выполнении работ была использована электронно-вычислительная аппаратура.

Процесс работы характеризуется такими вредными факторами, как недостаток естественного освещения, недостаточная освещенность рабочего места, возможность короткого замыкания и поражение исследователя током.

Необходимо, также учесть возможность возникновения чрезвычайной ситуации. Так как офисное помещение, в котором проходил процесс работы, находится в городе Томске, то наиболее типичной чрезвычайной ситуацией для данного региона является экстремально низкие температуры воздуха.

В данной главе рассмотрены и найдены решения для обеспечения удовлетворительных условий труда исследователя. Проведена



характеристика производственных процессов, анализ вредных и опасных факторов при данном виде производственной деятельности и решению вопросов безопасности, на основе требований действующих нормативно-технических документов.

Данная выпускная квалификационная работа была проведена в офисном помещении, оборудованном необходимой техникой для выполнения исследований, использования стандартного и специфического программного обеспечения. Для этого рабочего помещения будет приведен расчет такого производственного фактора, как освещенность.

### **5.1 Техногенная безопасность**

Рабочее помещение имеет линейные размеры 9,8х5,7м и высоту 3 м, находится на первом этаже здания. Помещение имеет три окна размерами 1,8х1,5м, которые расположены таким образом, что обеспечивают достаточное проникновение солнечного света. С противоположной от окон стороны находится дверной проем.

Помещение обеспечивает 7 рабочих места, оборудованных персональными компьютерами. Расположение оборудования приведено на рисунке 19.

Раздел «Техногенная безопасность» должен содержать анализ факторов рабочей зоны на предмет выявления их вредных и опасных воздействий. К первой группе факторов можно отнести микроклимат помещения, освещение рабочей зоны и шум, а также психофизические факторы. В качестве второй группы факторов необходимо рассмотреть возможность поражения электрическим током.

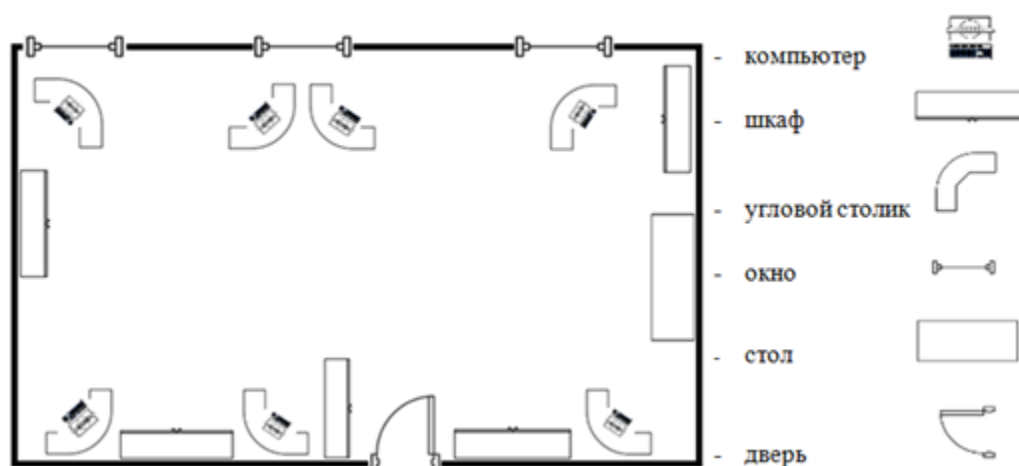


Рисунок 19 – План кабинета рабочей группы

## 5.2 Анализ вредных факторов на рабочем месте

### 5.2.1 Освещенность

Качество освещения влияет на работоспособность сотрудника, на его психологическое состояние в процессе выполнения работ. Наиболее благоприятное влияние на состояние сотрудника оказывает преимущественно естественное освещение. Нормы естественного, искусственного и совмещенного освещения зданий и сооружений, мест производства работ вне зданий представлены в СНиПе 23-05-95.

Основными регламентируемыми факторами норм освещения является характер зрительной работы, фон, контраст объекта с фоном, система и вид освещения.

Главной задачей текущего светотехнического расчета является определение необходимой мощности электрической осветительной установки для создания требуемой освещенности.

В расчетном задании должны быть решены следующие вопросы: выбор системы освещения; выбор источников света; выбор светильников и их размещение; выбор нормируемой освещенности; расчет освещения методом светового потока.

1. Выбор системы освещения. Для производственных помещений всех ПЭВМ назначений применяются системы общего (равномерного или

локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Система комбинированного освещения принимается в основном для помещений ремонта, регулировки, чистки и пайки аппаратуры и приборов, в прочих случаях следует использовать систему общего (равномерного или локализованного) освещения. Для данной рабочей зоны выбирается расчет общего равномерного освещения.

2. Выбор источников света. Источники света, применяемые для искусственного освещения, делят на две группы – газоразрядные лампы и лампы накаливания. Для выбранного типа освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы, так как они энергетически более экономичны и обладают большим сроком службы. Наиболее распространенными являются люминесцентные лампы. Для данной рабочей зоны выбираем лампу ЛД, для которой световой поток и мощность составляют 1650 Лм и 30 Вт, соответственно.

3. Выбор светильников и их размещение. Светильник – прибор, перераспределяющий свет ламп внутри больших телесных углов и обеспечивающий угловую концентрацию светового потока. Выбор типа светильников основывается на светотехнических требованиях, экономических показателях и условиях среды. Для данной рабочей зоны выбираем светильник накладной ОД, крепящийся на поверхность потолка, мощностью 30 Вт. Размеры светильника: 933x204мм.

Пространственное положение светильников в выбранном помещении определяется следующими параметрами:

- $H = 3$  – высота помещения;
- $h_c = 0,2$  – расстояние светильников от перекрытия (м);
- $h_n = H - h_c = 2,8$  – высота подвеса (м);
- $h_p = 0,7$  – высота рабочей поверхности (м);
- $h = h_n - h_p = 2,1$  – расчетная высота (м);
- $L$  – расстояние между соседними светильниками (м);
- $l$  – расстояние от крайних светильников до стены (м).

Оптимальное расстояние  $l$  от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным  $L/3$ .

Наиболее приемлемым расположением светильников является их расположение в шахматном порядке, либо по сторонам квадрата. В данном случае будет использовано размещение по сторонам квадрата.

Люминесцентные светильники при равномерном расположении обычно располагаются рядами. Основным критерием оптимального расположения светильников является величина  $\lambda = L/h$  - наивыгоднейшее расстояние между осветительными приборами, уменьшение которого удорожает устройство и обслуживает освещения, а чрезмерное увеличение ведет к резкой неравномерности освещенности. Данная величина зависит от кривой света светильника. Для выбранного светильника характерна кривая типа Д, где  $\lambda = 1,2 - 1,6$ . При выполнении расчета принимаем  $\lambda = 1,4$ .

Расстояние  $L$  между светильниками определяется как:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,1 = 2,94 \text{ м}$$

Расстояние от крайних светильников до стены:

$$l = L/h = 2,94/3 = 0,98 \text{ м}$$

Произведем расчет числа рядов и количества светильников в ряду.

Число рядов светильников в помещении:

$$N_A = \frac{A}{L} = \frac{5,8}{2,94} \approx 2$$

Число светильников в ряду:

$$N_B = \frac{B}{L} = \frac{5,31}{2,94} \approx 2$$

Так как помещение имеет прямоугольную форму, то разумнее добавить в каждый ряд по одному дополнительному светильнику, тем самым уменьшив расстояние между светильниками до 50 см. это позволит усилить освещенность помещения для более комфортной работы.

Таким образом, общее число светильников в помещении:

$$N = N_A \cdot N_B = 3 \cdot 2 = 6$$

На рисунке 20 изображен план кабинета и расположение источников света с люминесцентными лампами.

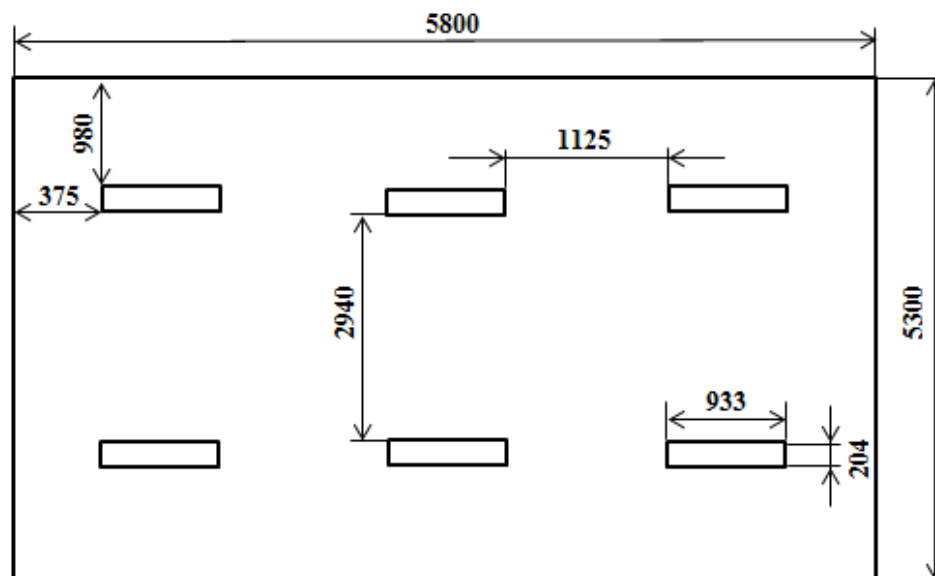


Рисунок 20 – План расположения источников света.

4. Выбор нормируемой освещенности. Основные требования по значениям нормируемой освещенности рабочих поверхностей сформулированы в СНиП 23-05-95. Выбор освещенности основан на таких условиях как размер объема различения (толщина линии, риски, высота буквы), контраста объема с фоном, характеристики фона.

В соответствии с требованиями по работе с ПК, при работе с экраном в сочетании с работой над документами наиболее оптимальной для работы с экраном является освещенность 200 Лк.

5. Расчет общего равномерного освещения. Для произведения расчета общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности используется метод коэффициента светового потока, который учитывает световой поток, отраженный от потолка и стен. Расчет общего равномерного уровня искусственного освещения горизонтальной поверхности рабочего места производится способом коэффициента светового потока:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot n} = \frac{200 \cdot 30,8 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,53} = 1598 \text{ Лм}$$

где  $E_n$  – нормируемая минимальная освещенность по СНиП 23-05-95,  $E_n = 200$  Лк (характеристика зрительной работы VI: Грубая (очень малой точности));  $S$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>;  $K_z$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен  $K_z = 1,5$ ;  $Z$  – коэффициент неравномерности освещения, для люминесцентных ламп при расчетах берется  $Z = 1,1$ ;  $N$  – число ламп в помещении, 12;  $n$  – коэффициент использования светового потока, 0,53.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения  $i$ , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью  $h$  и коэффициентов отражения стен  $\rho_c$  и потолка  $\rho_n$ .

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{30,8}{2,1 \cdot 11,11} = 1,3$$

Коэффициент отражения стен (свежепобеленное состояние стен с окнами, без штор):  $\rho_c = 50\%$ ;

Коэффициент отражения потолка (свежепобеленное состояние потолка):  $\rho_n = 70\%$ ;

Делаем проверку выполнения условий:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% \leq 20\%$$

$$\frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% = \frac{1650 - 1598}{1650} \cdot 100\% = 3,2\%$$

Таким образом:  $-10\% \leq 3,2\% \leq 20\%$ , необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона. Это означает, что мощность и количество осветительных приборов, для данного помещения выбраны правильно.

### 5.2.2 Шум

Шум — беспорядочные колебания различной физической природы, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. Длительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха, а в отдельных случаях — к глухоте. Установлено, что загрязнение шумовыми колебаниями среды, на рабочем месте, негативно влияет на работающих. Вследствие чего у них снижается внимание, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, замедляется скорость психических реакций и т.п. В конечном итоге снижается производительность труда и качество выполняемой работы.

Согласно ГОСТ 12.1.003-83 при разработке технологических процессов, проектировании, изготовлении и эксплуатации машин, производственных зданий и сооружений, а также при организации рабочих мест следует принимать все необходимые меры по снижению шума, воздействующего на человека, до значений, не превышающих допустимые.

Защита от шума должна обеспечиваться разработкой шумобезопасной техники, применением средств и методов коллективной защиты, в том числе строительно-акустических, применением средств индивидуальной защиты.

В первую очередь следует использовать средства коллективной защиты. По отношению к источнику возбуждения шума коллективные средства защиты подразделяются на средства, снижающие шум в источнике его возникновения, и средства, снижающие шум на пути его распространения от источника до защищаемого объекта. Снижение шума в источнике осуществляется за счет улучшения конструкции машины или изменения технологического процесса. Средства, снижающие шум в источнике его возникновения в зависимости от характера шумообразования подразделяются на средства, снижающие шум механического происхождения, аэродинамического и гидродинамического происхождения, электромагнитного происхождения.

Выбор ширины санитарно-защитной зоны зависит от установленного оборудования, например, ширина санитарно-защитной зоны вокруг крупных ТЭС может составлять несколько километров. Для объектов, находящихся в черте города, создание такой санитарно-защитной зоны порой становится неразрешимой задачей. Сократить ширину санитарно-защитной зоны можно уменьшением шума на путях его распространения.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, установленных СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Рабочая зона соотносится с категорией «Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно-управленческая деятельность, измерительные и аналитические работы в лаборатории; рабочие места в помещениях цехового управленческого аппарата, в рабочих комнатах конторских помещений, в лабораториях». Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для этой категории приведены в таблице 19.

*Таблица 19 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука*

Уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами [Гц]									Уровни звука в [дБ]
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	60
93	79	70	68	58	55	52	52	49	

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной (СКЗ) и индивидуальной защиты (СИЗ).

К СКЗ относятся:

- устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;



- изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения;
- применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения.

В качестве материала можно использовать минеральную вату, гипсокартон, стекловату, базальтовую вату, древесное волокно, вспененный полиэтилен и др.

К СИЗ – применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

Для расчета уровня шума, возникающего от нескольких источников, используется принцип энергетического суммирования излучений отдельных источников:

*Таблица 20 – Уровни шума источников в помещении*

Источник шума	Уровни звука в [дБ]
Жесткий диск	45
Вентилятор	50
Монитор	15
Клавиатура	10

$$L = 10 \lg \sum_{i=1}^n n \cdot 10^{0,1 \cdot L_i}, \quad (14)$$

где  $L_i$  – уровень звукового давления  $i$ -го источника шума;  $n$  – количество источников шума.

$$L = 10 \lg(4 \cdot 10^{0,1 \cdot 45} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 50} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 15} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 10}) = 57,22 \text{ дБА}$$

По расчету получено значение звука в помещении  $\sim 57$  дБА, которое не превышает предельно установленную величину в 60 дБА, что говорит о соблюдении уровня шума в рабочей зоне.

### 5.2.3 Микроклимат

Микроклимат производственных помещений — метеорологические условия внутренней среды помещений, которые определяются действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности, скорости движения воздуха и теплового излучения; комплекс физических факторов, оказывающих влияние на теплообмен человека с окружающей средой, на тепловое состояние человека и определяющих самочувствие, работоспособность, здоровье и производительность труда. В соответствии с СанПиНом 2.2.2/2.4.1340-03 и СанПиНом 2.2.4.548-96 показатели микроклимата: температура воздуха; относительная влажность; скорость его движения; мощность теплового излучения.

Для полноценной работы сотрудников необходимо соблюдение нормальных физиологических процессов в организме человека. Это возможно при соблюдении условия, если тепло выделяемое в помещении выделялось в окружающую среду. При соблюдении этого условия у сотрудника не возникает каких-либо ощущений термического дискомфорта - холода или перегрева.

Тип работ, выполняемых в рассматриваемом помещении, относится к категории Ia. Эти работы относятся к работам с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт), которые производятся сидя и сопровождаются незначительным физическим напряжением. Оптимальные величины показателей микроклимата приведены в таблице 21.

Для создания оптимальных параметров микроклимата в производственных помещениях используются системы кондиционирования, а обеспечение допустимых параметров – обычными системами вентиляции и отопления. В лаборатории осуществляется естественная и искусственная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери, а также через специальную систему контроля микроклимата. При такой системе вентиляции приточный воздух, поступающий в помещение через систему контроля микроклимата, проходит предварительную очистку и нагревание.

*Таблица 21 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений*

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	22-24	40-60	0,1
Теплый	Ia	23-25	40-60	0,1

Допускается наличие, в закрытых помещениях, микроклиматических показателей которые способны вызывать изменения теплового баланса организма. При условии, что не нарушается состояние здоровья, но возможно возникновение ощущения дискомфорта и снижение работоспособности. Допустимые параметры устанавливаются в производственных помещениях, где по каким-либо причинам, обеспечение оптимальных климатических параметров невозможно. Допустимые нормы для работ легкой категории приведены в таблице 22.

*Таблица 22 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений.*

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	15-28	20-80	< 0,5
Теплый	Ia	15-28	20-80	< 0,5

#### *5.2.4 Психофизические факторы*

К опасным и вредным психофизиологическим производственным факторам относятся физические (статические, динамические и гиподинамические) и нервно-психические перегрузки (умственные, зрительные, эмоциональные).

Так как выполнение работ связано с постоянным использованием ПК, то имеет место статическая физическая нагрузка в течение всего дня, что

сказывается отрицательно для работника. Это может привести к нарушению кровообращения в нижних конечностях и органах тазовой области, гиподинамии – нарушению функций организма при ограниченно двигательной активности, а также падению зрения. Для профилактики гиподинамии необходимо исключение статической работы, а так же изменение рабочей позы в процессе работы, проведение производственной гимнастики с рациональным комплексом физических упражнений и т.п.

Данная работа относится к формам труда с высоким нервно-эмоциональным напряжением. Исполнителю необходимо поддерживать уровень концентрации для непрерывного процесса работы с большими пакетами данных, выявления ошибок в ходе их обработки, нахождения «особых» точек в массивах действительных чисел и ввода печатного текста, что при длительной занятости может отразиться в виде снижения концентрации и ухудшения психологического состояния. Кроме негативного влияния на опорно-двигательную систему, постоянная работа за компьютером влияет на зрение работника, что сказывается на усталости глаз и возможного ухудшения зрения, так как в течение дня используется достаточно яркий экран, высокая концентрация на изображении заставляет моргать реже, от чего глаза пересыхают и быстрее устают. Во избежание этого нужно делать после каждых 20 минут работы перерыв на 20 секунд и смотреть на дальние объекты на расстоянии не менее 6 метров. Также для защиты глаз от излучения монитора желательно ношение очков с отражающим покрытием. Во избежание потери трудоспособности работника, предусматриваются комнаты психологической разгрузки.

### **5.3 Анализ опасных факторов на рабочем месте**

#### **5.3.1 Электробезопасность**

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и

опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Согласно требованиям электробезопасности (ГОСТ 12.1.019-79 «ССБТ. Электробезопасности. Общие требования и номенклатура видов защиты»). Всё электрооборудование и приборы должны находиться на специально отведенных местах, и заземлены. Сопротивление заземления должно быть не более 4 Ом.

В настоящее время большая доля внимания уделена электробезопасности, так как использование в повседневной жизни различного вида электроустановок неуклонно растет. Анализ опасности электрических сетей практически сводится к определению значения тока, протекающего через тело человека в различных условиях, в которых может оказаться человек при эксплуатации электрических сетей. Безопасной для человека является величина переменного тока – 10мА, постоянного – 50мА, безопасное напряжение 12В.

В используемом помещении применяются установки напряжением до 1 кВ. По электробезопасности помещение относится к первому классу – помещения без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18—20°, с влажностью 40-50%). Заземление металлических нетоковедущих частей обеспечивается присоединением вилки прибора к специальной розетке с заземляющим контактом. Имеется устройство защитного отключения. Защита от прямого прикосновения не требуется, поскольку отсутствуют электроустановки, а электрооборудование находится в зоне системы уравнивания потенциалов, и наибольшее рабочее напряжение не превышает 25 В переменного или 60 В постоянного тока.

К электрозащитным средствам относятся:

СКЗ от поражения электротоком:

- изолирующие штанги всех видов (оперативные, измерительные, для наложения заземления);

- указатели напряжения всех видов (высокого, низкого) и классов напряжений (с газоразрядной лампой, бесконтактные, импульсного типа, с лампой накаливания и др.);
- бесконтактные сигнализаторы наличия напряжения;
- защитные ограждения (щиты, ширмы, изолирующие накладки, колпаки);
- изолированный инструмент;
- указатели напряжения для проверки совпадения фаз, устройства для прокола кабеля, устройство определения разности напряжений в транзите, указатели повреждения кабелей;
- предупредительная блокировка, изоляция токопроводящих частей, заземление, зануление, изолирующие коврики и дорожки, использование малых напряжений, электрическое разделение сетей, выравнивание потенциалов, защитное отключение;
- изолирующие лестницы, канаты, вставки телескопических вышек и подъемников; штанги для переноса и выравнивания потенциала; гибкие изолирующие покрытия и накладки.

СИЗ от поражения электротоком:

- изолирующие и электроизмерительные клещи;
- переносные заземления;
- диэлектрические галоши, изолирующие боты и перчатки, каски защитные диэлектрические, изолирующие подставки, ковры.

### *5.3.2 Пожарная безопасность*

Одним из наиболее распространенных и опасных видов техногенных ЧС является пожар. Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага. Пожары причиняют значительный материальный ущерб, в ряде случаев вызывают тяжелые травмы и гибель людей. Основополагающими законодательными актами в области пожарной безопасности являются Федеральные законы "О пожарной безопасности" и

"Технический регламент о требованиях пожарной безопасности", определяющие общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в Российской Федерации.

Технический регламент о требованиях пожарной безопасности регламентирует классификацию зданий по степени огнестойкости, конструктивной и функциональной пожарной опасности. По пожарной опасности помещение и здание возможно отнести к классу Д, т.е. к помещениям, в которых находятся (обращаются) негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера. Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д. Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

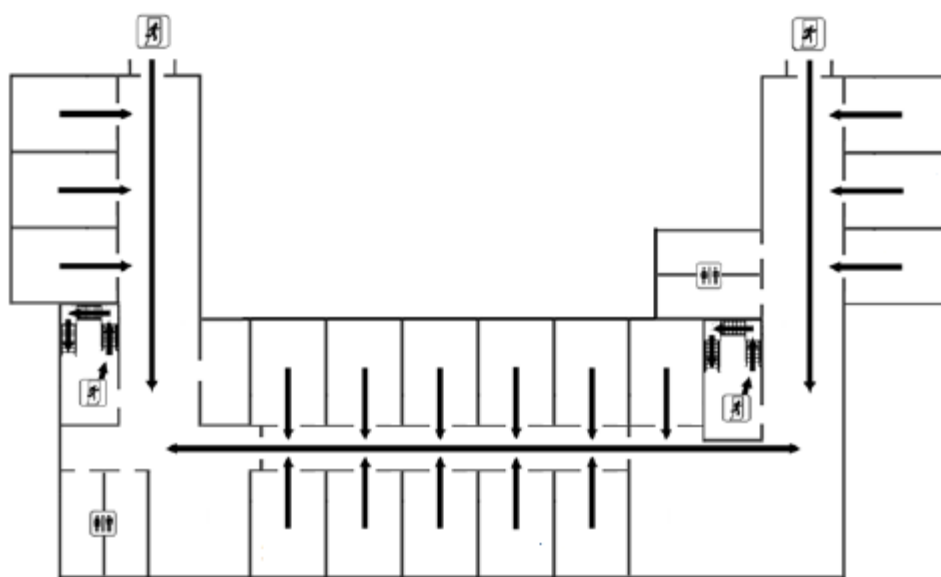
- использование только исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Основными видами защиты различных объектов от пожаров, являются средства сигнализации и пожаротушения. В рассматриваемом здании предусмотрена электрическая пожарная сигнализация, позволяющая быстро и точно указать место возникновения пожара. Сигнализация обеспечивает автоматический ввод в действие предусмотренных на объекте средств пожаротушения и дымоудаления.

В здании существуют пожарные краны. В качестве первичных средств пожаротушения используются углекислотные огнетушители ОУ-5.

Преимущества углекислотных огнетушителей: эффективность тушения жидких и газообразных веществ и электроустановок под напряжением до 1000 В; отсутствие следов тушения; диапазон рабочих температур от -40 °С до +50 °С.

Необходимость разработки плана эвакуации людей в случае пожара, инструкций к нему, а так же проектирование системы оповещения людей о пожаре в школах, назначение лиц имеющих право на её включение регламентированы п.п.16,17,102 ППБ 01-03. План эвакуации из рассматриваемого офисного помещения, изображен на рисунке 21.



*Рисунок 21 – План эвакуации людей при пожаре*

#### **5.4 Чрезвычайные ситуации**

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – состояние, при котором в результате возникновения источника чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде.

Чрезвычайные ситуации бывают техногенные и природные. Техногенные чрезвычайные ситуации вызваны производственной деятельностью человека, в то время как природные ЧС возникают по



причине природных явлений и процессов. Так, к техногенным чрезвычайным ситуациям относятся пожары и взрывы на производстве, аварии с выбросом химически опасных или радиоактивных веществ и т.д. Природные ЧС могут возникнуть ввиду наводнения, заморозка, урагана и т.д.

#### *5.4.1 Защита в чрезвычайных ситуациях*

При возникновении возгорания необходимо немедленно прекратить работу, отключить электрооборудование, позвонить в подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 010, сообщить о случившемся руководителю подразделения и приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения.

При поражении работника электрическим током необходимо как можно скорее освободить пострадавшего от воздействия электрического тока, проверить состояние пострадавшего и вызвать при необходимости скорую помощь. До приезда скорой помощи оказать пострадавшему необходимую первую помощь или, при необходимости, организовать доставку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение, о произошедшем несчастном случае поставить в известность руководителя структурного подразделения.

Офисное помещение расположено в городе Томск с континентально-циклоническим климатом и природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия. Для Сибири в зимнее время года характерны морозы и метели. В результате порывов ветра могут быть обрывы линий электропитания, из-за чего возможны перебои в электроснабжении; перегрузки, которые могут стать причиной пожара. Для предотвращения подобных ситуаций необходима организация системы аварийного электропитания, по возможности проведение линии электроснабжения под землей. Низкие температуры могут привести к авариям систем

теплоснабжения. В случае переморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

Также рекомендуется организация дополнительного служебного транспорта для лучшего сообщения, перемещения сотрудников и мобильности их в достижении аварийных участков

В последнее время, в связи с внешней политикой страны, возможны проявления диверсии. Угрозы могут быть как ложными, так и действительными, поэтому необходимы меры предосторожности по этому поводу. В качестве мер безопасности могут быть предприняты следующие действия – установка системы видеонаблюдения и круглосуточной охраны, сохранение конфиденциальной информации об охранной системе. Необходимо так же проводить информирование должностных лиц и тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

### **5.5 Охрана окружающей среды**

Охрана окружающей среды представляет собой комплекс мер, направленный на ограничение негативного воздействия человеческой деятельности на природу.

Одним из таких факторов является неподобающая утилизация люминесцентных ламп, используемых в системе освещения рабочего помещения. Люминесцентные лампы содержат от 3 до 5 мг ртути и относятся к 1 классу токсичных отходов. Следовательно, такого типа лампы требуют особые условия хранения, эксплуатации и утилизации.

Проблема переработки промышленного и бытового мусора значительно упрощается процессом его сортировки. В группе, в которой выполнялась данная работа, организован сбор промышленных отходов, сортировка и отправка их на утилизацию.

Макулатура (черновики, отработанная бумага и т.п.) будет собираться в размерах более одного килограмма. Утилизация производится по адресу

634024, г. Томск, ул. Трудовая, 11 компанией ООО «Пирс». Предварительно макулатура должна быть отчищена от посторонних предметов, таких как, например, скрепки.

Компания ООО «Экоорг» осуществляет утилизацию отработанных картриджей от принтеров практически всех компаний. Предварительная обработка картриджей бывших в употреблении не требуется.

ООО Научно-производственное предприятие «ЭКТОМ» осуществляет бесплатные сбор, обезвреживание и транспортировку опасных отходов отработанных люминесцентных ламп.

Отходы, содержащие гальванические элементы (например, батарейки) собирает на переработку компания «Батарейки, сдавайтесь!», у которой расположены точки сбора по всему городу.

## **5.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

По данной теме рассматриваются законодательные и нормативные документы:

- 1) инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ.
- 2) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы.
- 3) ГОСТ Р 50948-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности.
- 4) ГОСТ Р 50949-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности.
- 5) ГОСТ Р 50923-96. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.

- 6) ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные помещения. Параметры микроклимата в помещении.
- 7) ГОСТ 12.1.005 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
- 8) СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 9) ГОСТ 12.1.009 - 2009. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Термины и определения.
- 10) ГОСТ 12.1.030 - 81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
- 11) ГОСТ 12.1.038-82 (2001). Электробезопасность. Предельно допустимые значения прикосновения и токов.
- 12) НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
- 13) СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений.

## Список использованной литературы

1. Hideki Kyogoku. The current status and outlook for metal Additive Manufacturing in Japan / Hideki Kyogoku // Metal Additive Manufacturing, Autumn/Fall 2015. – Vol. 1, № 3. – P. 31–39.
2. Whittaker D. Developments in the additive manufacturing of titanium at PM Titanium 2015 / D. Whittaker // Metal Additive Manufacturing, Autumn/Fall. – 2015. – Vol. 1, №3.– P. 53–60.
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. - М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. - 520 с.
4. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы. – М.6 Metallurgia, 1976.
5. Dutta B. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys / B. Dutta, Francis H. Froes // Titanium Powder Metallurgy. 2015. P. 447–468.
6. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. Изд-во СПбГУ, 2013, 221 с.
7. Wang F. et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V //Metallurgical and Materials Transactions A. – 2013. – Vol. 44. №. 2. – P. 968-977.
8. Илларионов А.Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / Попов А.А. – Екатеринбург : Урал. ун-та, 2014. – 137 с.
9. Зайнудинов А.М., Александров Ю.Б. Перспективы использования 3D-печати в авиастроении. Международный научно-исследовательский журнал. №5 2015. 64-65 с.
10. Зленко М.А., Аддитивные технологии в машиностроении /Нагайцев.М.В, Довбыш В.М. // пособие для инженеров. – М.ГНЙ РФ ФГУА «НАМИ» 2015. 220 с.
11. Выборочная лазерная плавка (SLM) [Электронный ресурс]:URL: [http://3dtoday.ru/wiki/SLM\\_print/](http://3dtoday.ru/wiki/SLM_print/)

12. Bremen S., Meiners W., Diatlov A. Selective laser melting //Laser Technik Journal. – 2012. – Vol. 9. №. 2. – P. 33-38.
13. Xu W. et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti–6Al–4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition //Acta Materialia. – 2015. – Vol. 85. – P. 74-84.
14. Gong H. et al. Influence of defects on mechanical properties of Ti–6Al–4V components produced by selective laser melting and electron beam melting //Materials & Design. – 2015. – Vol. 86. – P. 545-554.
15. Qiu C., Adkins N. J. E., Attallah M. M. Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti-6Al-4V//Materials Science and Engineering: A. – 2013. – Vol. 578. – P. 230-239.
16. Simonelli M., Tse Y. Y., Tuck C. The formation of  $\alpha + \beta$  microstructure in as-fabricated selective laser melting of Ti–6Al–4V // Journal of Materials Research. – 2014. – Vol. 29. №. 17. – P. 2028-2035.
17. Электронно-лучевая плавка (EBM) [Электронный ресурс]:URL: [http://3dtoday.ru/wiki/EBM\\_print/](http://3dtoday.ru/wiki/EBM_print/)
18. Xiaoqing Wang. Scanning speed effect on mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy processed by electron beam additive manufacturing / Xiaoqing Wang, Xibing Gong, Kevin Chou // 43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME. – 2015. – Vol. 1. – P. 287–295.
19. Medical applications of titanium and its alloys: the material and biological issues. – American Society for Testing and Materials, USA, 1996. – 475 p.
20. Heintl P. et al. Cellular Ti–6Al–4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting //Acta biomaterialia. – 2008. – Vol. 4. №. 5. – P. 1536-1544.
21. С.В. Ахонин, Э.Л. Врижижевский, В.Ю.Белоус, И.К.Петриченко. 3D электронно-лучевая наплавка титановых деталей // автоматическая сварка №5-6. 2016. 141-144 с.

22. Григорьев А.В. Технологические особенности синтеза титановых сплавов методом селективного лазерного плавления: Автореф. Дис. канд. тех. Наук. – Санкт-Петербург, 2017 – 148 с.

23. Ненад Драганович Симич-Лафицкий. Селективное электронно-лучевое плавление титанового сплава ВТ6. «Студенческая научная весна 2014: Машиностроение технологии». 2014, 220-226 с.

24. Вульф Б.К. «Термическая обработка титановых сплавов», металлургия, 1969 – 376 с.

25. Haize Galarraga, Robert J. Warren, Diana A. Lados, Ryan R. Dehoff, Michael M. Kirka and Peeyush Nandwana. «Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM)». Materials Science & Engineering A. USA, 2017 – 685 с.